



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

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN: APLICACIÓN DE LEAN SIGMA EN EL ALMACENAMIENTO,  
MANEJO Y MANIPULACIÓN DEL CARBÓN EN LA CADENA INTERNA DE SUMINISTRO  
PARA LA REDUCCIÓN DE HUMEDAD Y AUMENTO DE EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE  
GENERACIÓN ELÉCTRICA**

**Noél Pantaleón Portillo**

Asesorado por el MA. Ing. Juan Amilcar López Ramos

Guatemala, octubre de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN: APLICACIÓN DE LEAN SIGMA EN EL ALMACENAMIENTO,  
MANEJO Y MANIPULACIÓN DEL CARBÓN EN LA CADENA INTERNA DE SUMINISTRO  
PARA LA REDUCCIÓN DE HUMEDAD Y AUMENTO DE EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE  
GENERACIÓN ELÉCTRICA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**NOÉL PANTALEÓN PORTILLO**

ASESORADO POR EL MA. ING. JUAN AMILCAR LÓPEZ RAMOS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO MECÁNICO INDUSTRIAL**

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
VOCAL V	Br. Carlos Enrique Gómez Donis
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Herbert René Miranda Barrios
EXAMINADOR	Ing. Rene Aguilar Marroquin
EXAMINADOR	Ing. Luis Antonio Tello
EXAMINADOR	Ing. Marcia Veliz Vargas
SECRETARIA	Inga. Gilda Marina Castellanos de Illescas

## 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: APLICACIÓN DE LEAN SIGMA EN EL ALMACENAMIENTO, MANEJO Y MANIPULACIÓN DEL CARBÓN EN LA CADENA INTERNA DE SUMINISTRO PARA LA REDUCCIÓN DE HUMEDAD Y AUMENTO DE EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudio de Postgrado, con fecha 10 de septiembre de 2018.



**Noél Pantaleón Portillo**

Guatemala, 11 de septiembre de 2018.

Director:  
Juan José Peralta Dardón  
Escuela de **Ingeniería Mecánica Industrial**  
Presente.

Estimado Director:

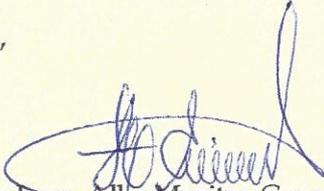
Reciba un atento y cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado los cursos aprobados del primer año y el Diseño de Investigación del estudiante **Noél Pantaleón Portillo** carné número **9112662**, quien optó la modalidad del "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 Industrial**.

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

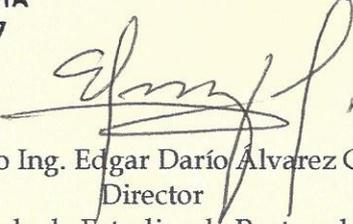
Sin otro particular, atentamente,

  
Maestró. Ing. Juan Amilcar López Ramos  
Asesor (a)  
**Juan Amilcar López Ramos**  
INGENIERO ELECTRICISTA  
COLEGIADO No. 6657

"Id y Enseñad a Todos"

  
Doctora Inga. Alba Maritza Guerrero  
Coordinadora de Área  
Gestión de Servicios



  
Maestro Ing. Edgar Darío Álvarez Co  
Director  
Escuela de Estudios de Postgrado  
Facultad de Ingeniería



Cc: archivo/L.Z.L.A.

**RESOLUCIÓN DE JUNTA DIRECTIVA:** Proceso de Graduación aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Decimo, Inciso 10.2, del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011.



REF.DIR.EMI.149.018

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el Visto Bueno del Revisor y la aprobación del Área de Lingüística del trabajo de graduación en la modalidad Estudios de Postgrado titulado **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN APLICACIÓN DE LEAN SIGMA EN EL ALMACENAMIENTO, MANEJO Y MANIPULACION DEL CARBÓN EN LA CADENA INTERNA DE SUMINISTRO PARA LA REDUCCIÓN DE HUMEDAD Y AUMENTO DE EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA**, presentado por el estudiante universitario **Noél Pantaléon Portillo**, aprueba el presente trabajo y solicita la autorización del mismo.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

  
Ing. **Juan José Peralta Dardón**  
**DIRECTOR**

**Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial**

Guatemala, octubre de 2018.



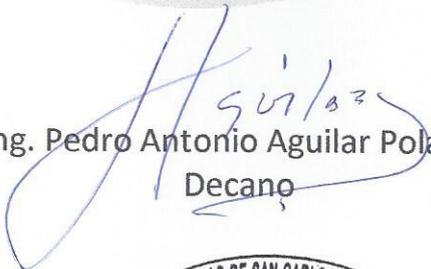
/mgp



DTG. 385.2018

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN: APLICACIÓN DE LEAN SIGMA EN EL ALMACENAMIENTO, MANEJO Y MANIPULACIÓN DEL CARBÓN EN LA CADENA INTERNA DE SUMINISTRO PARA LA REDUCCIÓN DE HUMEDAD Y AUMENTO DE EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA**, presentado por el estudiante universitario: **Noél Pantaleón Portillo**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

  
Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Decano

Guatemala, octubre de 2018

/gdech



## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS .....	VII
GLOSARIO .....	IX
1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. ANTECEDENTES .....	5
3. PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA .....	13
3.1. Descripción del problema .....	13
3.2. Formulación de preguntas .....	14
3.3. Preguntas auxiliares de investigación .....	14
3.4. Delimitación del problema .....	15
3.5. Viabilidad .....	15
3.6. Consecuencias de la implementación de la investigación .....	16
4. JUSTIFICACIÓN .....	17
5. OBJETIVOS .....	19
5.1. General.....	19
5.2. Específicos .....	19
6. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN.....	21

7.	MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL.....	23
7.1.	Planta de generación eléctrica .....	23
7.1.1.	Conceptos básicos .....	23
7.1.2.	Centrales eléctricas .....	24
7.1.3.	Centrales térmicas .....	26
7.1.4.	Centrales térmicas de ciclo combinado .....	27
7.1.5.	Centrales nucleares .....	28
7.1.6.	Centrales hidroeléctricas .....	31
7.1.7.	Centrales solares .....	33
7.1.8.	Parques eólicos.....	39
7.1.9.	Centrales de biomasa .....	40
7.1.10.	Generación de energía eléctrica en Guatemala .....	42
7.2.	Carbón mineral.....	43
7.2.1.	Clasificación de carbón mineral.....	45
7.3.	Cadena de suministro y de valor del carbón mineral .....	45
7.4.	Lean Sigma .....	49
7.4.1.	Gestión y mejora de procesos.....	50
7.4.1.1.	Productividad.....	50
7.4.1.2.	Mejora de la productividad .....	52
7.4.1.3.	Medición de la productividad .....	53
7.4.2.	Lean manufacturing o manufactura esbelta .....	58
7.4.2.1.1.	Herramientas Lean.....	60
7.4.3.	Seis Sigma .....	61
7.4.3.1.1.	Herramientas Seis Sigma.....	63
7.4.4.	Eficiencia global de equipos (OEE) .....	64
7.4.4.1.1.	Factores del cálculo de la eficiencia global de equipos.....	65

7.4.4.2.	Cálculo de la eficiencia global de los equipos .....	66
8.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	69
9.	METODOLOGÍA DE TRABAJO .....	71
10.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN.....	77
11.	CRONOGRAMA.....	79
12.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO .....	81
13.	REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA.....	83
14.	APÉNDICES.....	89



# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1.	Partes de un generador eléctrico .....	25
2.	Esquema de una central térmica.....	27
3.	Central térmica de ciclo combinado .....	28
4.	Esquema de funcionamiento de una central nuclear .....	30
5.	Central térmica nuclear .....	31
6.	Esquema de una central hidroeléctrica .....	32
7.	Esquema de una central hidroeléctrica de bombeo .....	33
8.	Esquema central solar de torre central.....	35
9.	Central solar de torre central en Sanlúcar la Mayor (Sevilla) .....	35
10.	Esquema central termosolar colectores cilíndrico-parabólicos.....	36
11.	Espejos cilíndrico-parabólicos en una central térmica solar.....	37
12.	Esquema de paneles fotovoltaicos.....	38
13.	Esquema de una central solar fotovoltaica.....	38
14.	Esquema de un parque eólico.....	40
15.	Esquema de una central eléctrica de biomasa.....	41
16.	Diagrama cadena de suministro y de valor del carbón mineral para una empresa generadora de electricidad .....	49
17.	La productividad y sus componentes .....	51
18.	Cronograma de actividades .....	79

## TABLAS

I.	Capacidad Instalada del Parque Generador.....	42
II.	Generación por tipo de combustible a jPunio 2017.....	43
III.	Tipos de desperdicio, síntomas, posibles causas e ideas y herramientas para eliminarlas.....	59
IV.	Relación entre el nivel de sigmas de un proceso y los costos de calidad .....	62
V.	Cuadro operativización de variables .....	73
VI.	Cuadro de gastos e inversión .....	82

## LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>BTU</b>	Unidad térmica británica ( <i>british thermal unit</i> )
<b>CaCl</b>	Cloruro de calcio
<b>CO</b>	Monóxido de carbono
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dióxido de carbono
<b>COPQ</b>	COSTO de calidad pobre ( <i>cost of poor quality</i> )
<b>DMAMC</b>	Definir, medir, analizar, mejorar y controlar
<b>ECP</b>	Eficiencia del ciclo del proceso
<b>°F</b>	Grado fahrenheit
<b>GWh</b>	Gigawatt hora
<b>KW</b>	Kilovatio (kilowatt)
<b>Lb</b>	Libra
<b>MW</b>	Megavatio ( <i>megawatt</i> )
<b>m/s</b>	Metro sobre segundo
<b>OEE</b>	Eficiencia Global de equipo ( <i>overall equipment effectiveness</i> )
<b>PEPSU</b>	Proveedores-entradas-proceso-salidas-usuarios
<b>Plg</b>	Pulgada
<b>PNP</b>	Paradas no programadas
<b>PP</b>	Paradas programadas
<b>PPM</b>	Parte por millón
<b>Psi</b>	Pulgada sobre pulgada cuadrada ( <i>pound squared inch</i> )

<b>QFD</b>	Despliegue de la función de calidad ( <i>quality function deployment</i> )
<b>SIPOC</b>	Suppliers-inputs-process-outputs-customers
<b>SMED</b>	Intercambio de matriz en un solo minuto ( <i>single-minute exchange of die</i> )
<b>SPT</b>	Sistema de producción toyota
<b>TFR</b>	Tiempo de funcionamiento real
<b>TO</b>	Tiempo de operación
<b>TPM</b>	Mantenimiento productivo total ( <i>total productive maintenance</i> )
<b>€</b>	Euro
<b>\$</b>	Dólar estadounidense
<b>%</b>	Porcentaje

## GLOSARIO

<b>Biomasa</b>	Fuente de energía renovable que procede de materiales orgánicos, por lo regular de origen forestal y agrícola, y de residuos de origen animal y humano.
<b>Caldera</b>	Equipo o dispositivo que convierte un líquido a estado gaseoso por medio de la transferencia de calor a presión constante.
<b>Calor</b>	Es el flujo de energía que se da por el aumento o diferencia de temperatura.
<b>Carbón mineral</b>	Es una roca sedimentaria de color negro rica en carbono utilizada como combustible fósil.
<b>Ciclo Brayton</b>	También conocido como ciclo Joule o ciclo Froude, que consiste en una etapa de compresión adiabática, una etapa de calentamiento isobárico, una expansión adiabática de un fluido termodinámico compresible y remoción de calor a presión constante, este ciclo es la base de una turbina de gas.
<b>Ciclo Rankine</b>	Es un ciclo termodinámico que consiste en calentar agua en una caldera hasta su punto de evaporación y elevar la presión de vapor, y este es inyectado a una turbina. El vapor de baja de presión que es

extraído de la turbina se introduce en condensador para condensar el vapor y cambiarlo a estado líquido, y por medio de una bomba el líquido es llevado nuevamente introducido a la caldera.

**Coque**

El coque es un combustible sólido formado por la destilación de carbón bituminoso calentado a temperaturas de 500 a 1100 °C sin contacto con el aire.

**Efecto fotoeléctrico**

Es el fenómeno en que las partículas de luz, fotones, impactan sobre un metal, emitiendo electrones con lo cual se da origen a una corriente eléctrica.

**Eficiencia**

Capacidad de realizar o cumplir una actividad con el uso adecuado de los recursos disponibles.

**Energía**

Es la capacidad para producir un trabajo.

**Fisión**

Es una reacción nuclear, que se da con la división de un núcleo atómico pesado en dos o más fragmentos de igual tamaño, esta división se da cuando el núcleo es bombardeado con neutrones.

**Generación eléctrica**

Es la producción de energía eléctrica por medio de la transformación de otra forma de energía.

**Heliostato**

Es un conjunto de espejos direccionales que captan y reflejan la radiación solar.

**Reactor nuclear**

Instalación donde se inicia, se mantiene y se controlan las reacciones de fisión en cadena producidas en el núcleo de la instalación.



# 1. INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se estará abordando la solución al problema de la presencia de la humedad en el carbón mineral y sus efectos en la eficiencia de una planta de generación eléctrica. Con las mejoras que se proponen se busca reducir la presencia de humedad en el carbón, por medio de la sistematización de la cadena interna de suministro del carbón mineral.

El mercado energético de Guatemala es bastante competitivo, debido a la ampliación de la matriz energética, por lo tanto, la planta debe ser eficiente para reducir costos y así obtener una ventaja competitiva. Con la metodología que se propone, se busca mejorar el manejo y manipulación del carbón, aumentar la eficiencia de la caldera y la eficiencia global de la planta.

En este trabajo de investigación, se analizará la situación de la empresa para encontrar debilidades y áreas de oportunidad de mejora de los procesos de la planta, para lo cual se recopilarán datos de eficiencias, se revisarán los procesos y se analizará las variables del proceso de la cadena interna de suministro de carbón mineral, y se evaluará la información obtenida para presentar o proponer las mejoras en los procesos para la reducción de la humedad en el carbón mineral.

En la presente investigación, se recopilarán datos históricos de eficiencias de planta y de la humedad del carbón mineral, revisando la bitácora de operación de la planta y los reportes de control de calidad. Además, se recabará información de datos operativos de los equipos y manejo del carbón por medio de entrevistas o cuestionarios dirigidos al personal operativo,

supervisores y gerentes. Se empleará la observación para recabar información sobre la operación de los equipos y del proceso de la cadena interna de suministro del carbón mineral.

Con el presente trabajo se busca proporcionar a una planta de generación eléctrica a base de carbón mineral, una metodología que permita reducir la presencia de humedad en el carbón y aumentar la eficiencia de generación eléctrica, eficiencia de las calderas y de los equipos que componen la cadena interna de suministro de carbón. El esquema de solución a seguir es el siguiente:

- Analizar situación de la empresa para encontrar debilidades y área de oportunidad de mejora de los procesos de la planta, se recopilarán datos históricos de las eficiencias de la planta.
- Revisión de los procesos y análisis de variables de los procesos de la cadena de suministro interna.
- Determinar la metodología y las herramientas adecuadas para la medición y análisis de la eficiencia de los equipos.
- Evaluar información obtenida y definir la metodología adecuada para proponer las mejoras a los procesos, para la reducción de la humedad en carbón mineral.

Los recursos físicos, humanos y de información serán proporcionados por la empresa donde se realizará la investigación. El financiamiento de los gastos de materiales (papelería y útiles) y tecnología (internet) en los que se incurra

durante la investigación serán aportados por la empresa, y los gastos de capital humano (tiempo y asesor), serán proporcionados por el investigador.

En el primer capítulo del marco teórico, se describe los diferentes tipos de plantas de generación eléctrica y sus generalidades, así como aspectos relevantes de la industria de generación eléctrica en Guatemala. Se hace mención del combustible que la planta en estudio utiliza como fuente primaria de energía, el cual es el carbón, y se expone la cadena de suministro y de valor. Además, se aborda la metodología Lean Sigma para el aumento del desempeño de los procesos, por medio de la detección y eliminación de desperdicios y de causas de fallos o defectos.

En el segundo capítulo, se presentan los resultados del trabajo de investigación, el cual se soporta en las herramientas de Lean Sigma para el análisis de los procesos de la cadena de la cadena de suministro del carbón mineral y que son la base para presentar las estrategias y propuestas de mejora.

El tercer capítulo consta de la discusión de los resultados alcanzados en la investigación realizada en la planta generadora de energía eléctrica.



## 2. ANTECEDENTES

El carbón mineral es una roca sedimentaria de color negro, rica en carbón y es utilizada como combustible, y es ampliamente utilizada para la generación eléctrica. El carbón mineral es ampliamente utilizado para la generación de energía eléctrica. El carbón suministra el 25 % de la energía primaria consumida en el mundo, detrás del petróleo. Guatemala no ha sido la excepción, y ha ampliado su matriz energética dando cabida el uso de carbón mineral para la generación de energía eléctrica. “El carbón representó un 32,56 % de los 1,819.47 GWh generados a abril de 2017” (MEM, 2017).

El uso de carbón mineral representa varios problemas, tanto ambientales como físico-químicos. El carbón mineral es un combustible contaminante, por lo que es necesario e imprescindible utilizar controles de ingeniería, para reducir las emisiones contaminantes, de los cuales mencionar los precipitadores electrostáticos. El carbón posee una característica de auto ignición y este fenómeno se incrementa con la presencia de varios factores como temperatura, aire y humedad. La humedad en el carbón incrementa las posibilidades de auto ignición; además de influir o disminuir la eficiencia en la generación eléctrica, esto obedece a que reduce el *heat rate*. Además, presenta problemas en el manejo del mismo en los diferentes equipos de la planta generadora de los cuales se puede mencionar: acumulación y endurecimiento alrededor de las paredes de los conductos, atascamiento en tolva, reducción del rendimiento de trituradores (Bhatt & Rajkumar, 2015).

El país de India también utiliza el carbón mineral para generar energía eléctrica y han tenido consecuencias y efectos en la eficiencia de sus plantas

generadoras debido a la humedad del carbón, lo cual crea dificultades en la combustión creando un retardo térmico durante el proceso de combustión. Las soluciones que se han implementado en las diferentes plantas de India son: utilización carbón mineral de fondo arenoso, mezcla de carbón de bajo rango y alto rango, guardas para transportadores, lonas para cubrir vagones de transporte, mejoramiento de diseño de las pilas de almacenamiento, mediante compactación, formas piramidales con drenajes en ambos lados (Bis, 2014).

El carbón por su naturaleza higroscópica reabsorbe una humedad considerable aun después de ser secado con métodos convencionales afectando el desempeño de la caldera. La humedad en el carbón afecta la pulverización donde se utiliza la combustión por medio de carbón pulverizado. Existen varios métodos de secado del carbón de pre-combustión, el de secado integral y el método de gasificación parcial del carbón, utilizando el gas de combustión o de escape. (Bhattacharya, Banerjee, & Sarkar, 2013, pages 22-28).

El Seis Sigma es una herramienta poderosa utilizada para procesos, calidad, control de inventario, etc., en varias industrias, incluyendo las generadoras eléctricas. Con esta herramienta se puede recabar información relevante de ingreso de materia prima para un período de un año de funcionamiento continuo de la planta y analizarla para presentar una solución. Otra área de aplicación del Seis Sigma es de proveer mediciones para la reducción en el consumo de agua desmineralizada en plantas generadoras de electricidad. (Sudhakar, Prasad & Prahladarao, 2015, pp. 15-23).

Alarcón (2014) propone la utilización de OEE (*Overall Equipment Effectiveness*) y el SMED (*Single Minute Exchange of Die*) como técnicas de Lean Manufacturing o producción esbelta para medir y mejorar la productividad

de una empresa del sector plástico. La utilización del OEE presenta en forma clara las pérdidas productivas de un determinado equipo, y estas a la vez pueden ser eliminados con el uso de la herramienta SMED, lo que se traduce en reducción de costos, aumento de la productividad y por ende, ser más competitivo. Con la aplicación de estas técnicas se obtuvo un incremento en la productividad del 28.9%, y se pudo constatar que había un desperdicio del 38.64% del recurso humano.

Limón (2015) en su tesis expone la importancia del cambio de un proceso de producción convencional a un proceso de manufactura esbelta de una línea de ensamble automotriz, utilizando las herramientas de manufactura esbelta: OEE, Kaizen, Trabajo Estandarizado, Cambio de Modelo, Pull System y Solución de Problemas. Los resultados que se obtuvieron son los siguientes:

- La eficiencia total del equipo refleja una disminución del 7.5%, pero se obtuvo un incremento del 5.5% en la disponibilidad operativa y del 0.90% en la tasa de calidad.
- Se redujo en un 79.86% el tiempo de procesamiento de una orden del cliente.
- Se redujo en 50% el inventario de producto terminado, equivalente a 0.5 días.

Urbasos (2011) expone la problemática del aprovisionamiento óptimo del carbón mineral y la gestión del riesgo de precio de las centrales de carbón. Urbasos propone en su trabajo de tesis el desarrollo una herramienta para calcular la planificación de entradas óptimas a futuro, tomando como base las previsiones de funcionamiento de las centrales, además de aplicar un modelo

para calcular las coberturas necesarias para fijar los costos variables a futuro de una planta termoeléctrica de carbón y asegurar el margen sin riesgo alguno. Para resolver la problemática planteada es necesario realizar operaciones de cobertura, contratar derivados financieros (futuros sobre carbón y fletes, derechos de emisión de CO<sub>2</sub> y futuros de divisa \$/ €). Las salidas o los resultados de los modelos ayudan a conocer la opción óptima de compra a futuro, según las previsiones de funcionamiento y calcular con precisión el coste variable futuro de las centrales de carbón.

Rueda (2007) en su trabajo expone sobre la aplicación de las metodologías Seis Sigma y Manufactura Esbelta en una empresa manufacturera de jeringas hipodérmicas desechables, con el fin de reducir costos. Se elaboró un mapa de corriente de valor para encontrar el proceso con mayor oportunidad de mejora y por medio de un análisis de costos de calidad pobre (COPQ en sus siglas en inglés), se determinó en que parte del proceso se debía de enfocar. En el siguiente paso se aplicaron herramientas de la metodología de Seis Sigma, basada en el ciclo DMAMC (definir, medir, analizar, mejorar y controlar). Los resultados obtenidos de la aplicación de la metodología Lean Sigma fueron los siguientes:

- El mayor tiempo consumido tiempo consumido fue debido a la llegada del material de empaque y que la inestabilidad en el proceso de empaque conllevaba a requerir mayor cantidad de mano de obra.
- Reducción en la variabilidad en las etapas de sellado y formado, y aumento de la eficiencia estándar de producción en la etapa de empaque, con lo cual se pronosticó un ahorro de USD 10,000.00 anuales.

- Reducción en un 4 % del desperdicio de la línea, lo que se tradujo en una reducción de los costos variables, debido a que se evitó el desperdiciar papel y película, y de jeringas marcadas y ensambladas.

Veloz (2002) presenta en su trabajo la recuperación de carbón mineral a partir de las pilas de desperdicio de una carbonífera, cuyo objetivo es la obtención de un producto carbonoso con un rango del 38 % al 42 % de peso de contenido no deseable (ceniza). Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

- Aprovechamiento de un recurso no renovable en un 20 %.
- Recuperación del desperdicio generado de 397 046 toneladas.
- Obtención de un beneficio económico de USD 13 099 800.00 generado por la recuperación del desperdicio.

Segun Kumar (2011), la combustión espontánea es otro problema que presenta el carbón mineral y se agudiza con la presencia de humedad y de un manejo incorrecto del carbón. Existen varios factores que contribuyen a la combustión espontánea:

- Factores inherentes al carbón
  - Tamaño de las partículas del carbón y área superficial.
  - Contenido de humedad.
  - Composición del carbón, calidad y rango del carbón.
  - Conductividad de calor de las partículas.

- Condiciones extrínsecas:
  - Grado de compactación
  - Temperatura
  - Presión barométrica
  - Concentración de oxígeno
  - Dimensión y forma de pilas

Se ha propuesto un enfoque de tres fases que se centra en uso de conceptos de identificación de riesgos, detección, monitoreo, control y manejo de pilas de carbón, esta metodología asegura que el carbón sea usado de la manera más eficiente y efectiva en las pilas de almacenamiento, concentrando esfuerzos donde existan áreas de oportunidad para mejorar.

- Fase 1. Prevención: Mitigar los efectos de los factores responsables del aumento de la combustión espontánea.
  - Selección apropiada de la distribución de partículas.
  - Evitar segregación.
  - Prestar la atención debida a la preparación y mantenimiento de pilas de almacenamiento.
  - Compactación apropiada.
  - Limitar la humedad a un 3 % para evitar el incremento de la oxidación.

- Dimensiones de las pilas de almacenamiento.
- Utilización de cubiertas de material inerte con suficiente resistividad al calor.
- Fase 2. Monitoreo: Un sistema de alerta temprana para prevenir el inicio de fuego.
  - Registros de temperatura.
  - Monitoreo termográfico continuo.
  - Pruebas de compactación.
  - Pruebas de gases.
- Fase 3. Control: El monitoreo es fundamental como primera medida para controlar la combustión espontánea.
  - Después de la primera indicación de presencia puntos calientes, equipo de remoción de tierra se debe de utilizar para excavar el material caliente.
  - Uso de un sellador, compuesto de un inhibidor de oxidación (CaCl) y un agente aglutinante y relleno (bentonita).
  - Flujo de gas inerte (Kumar, 2011).

Las investigaciones previas son de suma importancia para la elaboración del presente trabajo, debido a que aportan metodologías y técnicas de secado para la reducción de la humedad en el carbón mineral:

- Secado del carbón de pre-combustión
- El de secado integral
- Método de gasificación parcial del carbón

Además, presentan la utilización de las diferentes herramientas de lean manufacturing (manufactura esbelta) y Seis Sigma para medir, mejorar e incrementar la productividad de los procesos de una empresa, por ejemplo:

- SMED (Single Minute Exchange of Die)
- OEE (Overall Equipment Effectiveness)
- Kaizen (mejora continua)
- Trabajo estandarizado
- Solución de problemas.

Otro de los aportes es la aplicación de métodos para prevenir la combustión espontánea del carbón mineral, y que aseguran el uso eficiente y efectivo del carbón mineral en las pilas de almacenamiento.

### **3. PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA**

Pérdida de eficiencia de generación, debido a la presencia de humedad en carbón mineral en una planta de generación eléctrica.

#### **3.1. Descripción del problema**

La empresa se ubica en el departamento de Escuintla y se dedica a la generación de energía eléctrica, la cual inyecta al sistema o red nacional de electricidad. La planta es una central térmica convencional que utiliza combustible fósil, carbón mineral, como energía primaria para la generación de electricidad.

La empresa utiliza el carbón mineral para la generación de electricidad, y este tipo de combustible, debido a su forma y composición química es almacenado a la intemperie y transportado a granel en contenedores abiertos, y durante el recorrido de la mina al consumidor el carbón se satura de humedad, sobre todo, en época lluviosa. La presencia de humedad en el carbón hace que sea difícil su manejo y manipulación, se vuelve pegajoso y presenta inconvenientes en la cadena interna de suministro, acumulación y endurecimiento alrededor de las paredes de los conductos, atascamiento en tolva, reducción del rendimiento de trituradores, lo cual se traduce en el incremento de los costos de operación debido a la disminución de la eficiencia de la caldera y en el decremento de la eficiencia general de la planta.

Otra consecuencia de la presencia de humedad del carbón mineral es que ayuda a la combustión espontánea del carbón. La combustión espontánea es el

calentamiento propio del carbón que resulta en la ignición sin aplicación de calor. El carbón cuando tiene contacto con el aire absorbe oxígeno en la superficie expuesta a la intemperie, y esta oxidación produce gases (CO, CO<sub>2</sub> y vapor de agua) juntamente con el incremento de calor y temperatura, lo cual favorece a que el carbón llegue al punto de ignición causando fuego. La combustión espontánea repercute en los costos por pérdidas de carbón, se disminuye el inventario, además de implicaciones en la contaminación del medio ambiente y la seguridad física de los colaboradores e instalaciones.

### **3.2. Formulación de preguntas**

- Pregunta central

¿Cuál es la estrategia que se debe de implementar en una planta generadora de electricidad para la reducción de humedad en el carbón mineral?

### **3.3. Preguntas auxiliares de investigación**

¿Cuál es la eficiencia de generación de una planta de generación eléctrica a base de carbón?

¿Qué procesos se deben de mejorar para reducir la humedad en carbón mineral e incrementar la eficiencia de la generación?

¿Cuál es la metodología adecuada para la medición y análisis de la eficiencia de equipos?

¿De qué manera incidirá la implementación de Lean Sigma y buenas prácticas de almacenamiento, manejo y manipulación del carbón mineral, en la

reducción de humedad y en el incremento de la eficiencia de la generación eléctrica?

#### **3.4. Delimitación del problema**

La investigación se realizará en una empresa generadora de electricidad a base de carbón mineral ubicada en el departamento de Escuintla, durante los meses de julio 2017 a noviembre 2018.

#### **3.5. Viabilidad**

Existe el problema de presencia de humedad en el carbón mineral y la empresa tiene el conocimiento del mismo y esta anuente a poder resolverlo. Se cuenta con información relacionada a los inconvenientes y consecuencias que ha generado el problema a investigar. Existe información y datos históricos de la planta, y acceso a la misma, para realizar el análisis respectivo del comportamiento de la eficiencia. La empresa es sólida y bien posicionada en el mercado energético y cuenta con los recursos suficientes para aplicar las medidas necesarias para mejorar la eficiencia en la generación eléctrica.

El financiamiento de los gastos de materiales (papelería y útiles) en los que se incurra durante la investigación serán aportados por la empresa, y los gastos de capital humano (tiempo y asesor), serán proporcionados por el investigador.

### **3.6. Consecuencias de la implementación de la investigación**

De realizarse:

- Se conocerán las causas o factores que influyen en la humedad del carbón mineral y en consecuencia se puede buscar la manera de eliminar estas causas.
- Minimizar los paros en la cadena interna de suministro de carbón y así aumentar las eficiencias de los diferentes equipos de la cadena de suministro.

De no realizarse:

- Se incurre en costos debido a pérdida de eficiencias de equipos, de la caldera y global de la planta.
- La continuación de paros en la cadena interna de suministro de carbón mineral.
- Costos debido pérdida de carbón mineral por la combustión espontánea.

## 4. JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo cumple con la línea de investigación de mejoramiento y gestión de procesos de la maestría en Gestión Industrial, con el fin de aumentar la productividad y eficiencia en la generación eléctrica. En la mayoría de las empresas de generación eléctrica a base de carbón mineral y en las minas de explotación de carbón existe el problema de humedad del carbón. La humedad del carbón mineral se divide en humedad inherente, es decir que está presente dentro de la estructura química, y humedad superficial, la que se adhiere a la superficie del carbón mineral. La humedad inherente o equilibrada es un parámetro no controlable, mientras que la humedad superficial es una cantidad añadida y puede variar en rangos dependiendo de la cantidad de agua al que está expuesto el carbón. La humedad que estará sujeta a investigación y control en el presente trabajo es la humedad superficial, debido a que es un parámetro controlable. El carbón mineral húmedo es muy difícil de manipular y presenta problemas en los transportadores, tolvas, conductos, trituradores o pulverizadores.

Existe la necesidad de controlar el parámetro de humedad en el carbón mineral para mejorar la eficiencia en el de manejo del carbón, de la caldera y por ende la de la planta en general. El presente trabajo es de vital importancia, porque se pretende buscar una solución para reducir la cantidad de humedad del carbón mineral para generación, con lo cual se incrementaría la eficiencia y la rentabilidad de la planta, lo que se traduce en una ventaja competitiva.

Es interesante y motivante el formular o presentar una propuesta para mejorar el proceso de manejo y manipulación del carbón de mineral, que ayude

a la reducción de humedad del carbón mineral, y que conlleve a un incremento en la eficiencia de la planta.

Los beneficios que se generan a la empresa, por medio del presente trabajo de investigación, son los siguientes:

- Incremento en la rentabilidad de la empresa y que sea competitiva en el mercado energético.
- Reducción de costos, tomando en cuenta que la competencia es muy agresiva y cerrada, por lo que es menester el reducir los costos de generación, lo cual se puede lograr utilizando un carbón más seco.

Los beneficiarios de las mejoras planteadas en la presente investigación son la empresa y los trabajadores de esta, debido a que la empresa se convierte más competitiva y rentable, lo que contribuye también en la estabilidad laboral de los empleados.

## **5. OBJETIVOS**

### **5.1. General**

Aplicar herramientas de la metodología Lean Sigma en el almacenamiento, manejo y manipulación del carbón en la cadena de suministro para la reducción de humedad y aumento de eficiencia de una planta de generación eléctrica.

### **5.2. Específicos**

- Determinar la eficiencia de la planta en la generación de energía eléctrica previo a la propuesta que se presenta en este trabajo.
- Analizar los procesos y determinar cuáles deben de ser mejorados, para reducir la humedad en el carbón mineral.
- Definir la metodología adecuada para el análisis de resultados de eficiencias de equipos, causas de ineficiencias, desperdicios o del incumplimiento de variables e indicadores.
- Determinar en qué forma incidirá en la reducción de humedad del carbón mineral y en la eficiencia de la generación eléctrica, la aplicación de herramientas de Lean Sigma y de buenas prácticas de almacenamiento, manejo y manipulación del carbón mineral.



## **6. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN**

Con el presente trabajo se propone una solución para la disminución o reducción de la humedad del carbón mineral, con el fin de incrementar la eficiencia y mejorar la productividad de una planta de generación eléctrica.

Se estará analizando la situación presente de la empresa y su cadena de suministros interna, y proponer una solución de gestión para aplicarla en la misma. Para llevar a cabo el análisis y propuesta de mejora se emplearán los conocimientos adquiridos (herramientas y técnicas) en la maestría de Gestión Industrial.

Pasos:

- Analizar situación de la empresa para encontrar debilidades y área de oportunidad de mejora de los procesos de la planta, se recopilarán datos históricos de las eficiencias de la planta.
- Revisión de los procesos y análisis de variables de los procesos de la cadena de suministro interna.
- Determinar la metodología y las herramientas adecuadas, para la medición y análisis de la eficiencia de los equipos.
- Evaluar información obtenida y definir la metodología adecuada, para proponer las mejoras a los procesos para la reducción de la humedad en carbón mineral.



## **7. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL**

### **7.1. Planta de generación eléctrica**

La generación eléctrica consiste en transformar una clase de energía primaria en energía eléctrica, y para llevar a cabo esta transformación se recurre al uso de instalaciones conocidas como plantas de generación eléctrica o centrales eléctrica. La generación de la energía eléctrica se realiza por medio de un generador eléctrico, que es impulsado por una turbina.

#### **7.1.1. Conceptos básicos**

Energía eléctrica: es una fuente de energía que se obtiene, a través del movimiento de cargas eléctricas (electrones) y que fluye en el interior de un material conductor (cable de cobre) impulsada por un diferencial de potencial eléctrico de forma continua o alterna.

Generación eléctrica: producción de energía eléctrica por medio de la transformación de otra forma de energía.

Central de generación: Es una instalación que obtiene o que produce electricidad, a partir de diferentes tipos de fuentes de energía primaria, de las cuales se puede mencionar el gas natural, carbón mineral, bunker y diésel.

### 7.1.2. Centrales eléctricas

Mujal (2003) expone que una central eléctrica es una instalación que convierte o transforma la energía mecánica en energía eléctrica. La energía mecánica necesaria para la transformación a energía eléctrica es obtenida de otras fuentes de energía primaria:

- energía potencial del agua
- energía térmica de combustibles fósiles (gas natural, carbón mineral, bunker, diésel)
- energía de fisión del uranio.

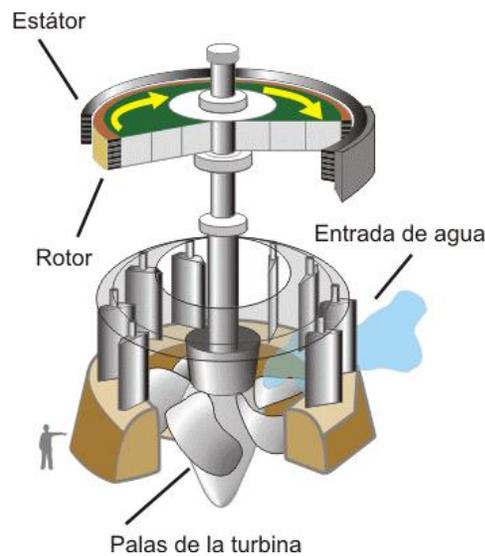
La conversión de energía mecánica a energía eléctrica se realiza por medio de un generador eléctrico que consta de dos partes:

- estator: también llamado inductor, es la parte fija que consta de un tambor hueco cuya superficie interior posee ranuras que alojan un bobinado de cobre interconectado.
- rotor: es la parte móvil o giratoria, que consta de un eje que se aloja en el interior del estator y también posee ranuras que alojan otro bobinado de cobre interconectado que actúa como electroimán cuando se le es aplicada una pequeña cantidad de corriente que proviene de la excitatriz.

La energía mecánica en forma de caída de agua de un nivel superior, de vapor de agua, gas de combustión a alta presión o por fisión de uranio, impulsa los alabes de la turbina. La turbina a la vez transmite el movimiento rotacional

al rotor, lo cual produce una corriente inducida en los hilos de cobre del bobinado del rotor, generando la energía eléctrica (Rodríguez, González, Rojas & Palacios, 2013).

Figura 1. **Partes de un generador eléctrico**



Fuente: <http://acer.forestales.upm.es/basicas/udfisica/asignaturas/fisica/magnet/generador.html>

Las centrales eléctricas se clasifican, según el combustible o energía primaria que es utilizada por la central para la generación eléctrica:

- centrales térmicas
- centrales nucleares
- centrales hidroeléctricas
- centrales solares
- centrales eólicas
- centrales de biomasa

### **7.1.3. Centrales térmicas**

Una central térmica es la que obtiene la energía mecánica por medio del vapor producido en una caldera al hervir agua. El vapor a alta presión generado en la caldera es inyectado a las turbinas para mover los álabes de la misma, transformando la energía calorífica en energía mecánica.

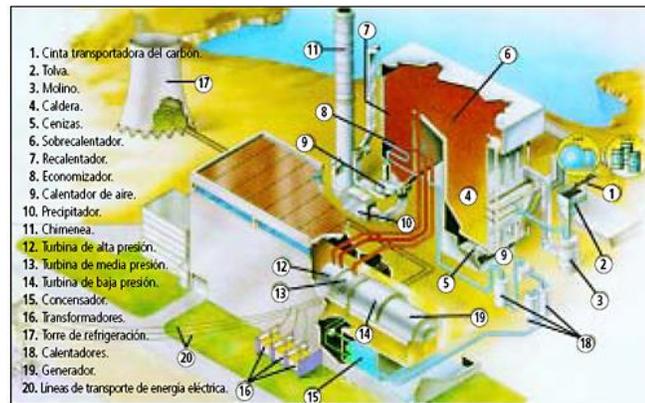
En este tipo de centrales térmicas, para producir el vapor de agua a alta presión, se utilizan combustibles fósiles:

- gas natural
- carbón mineral
- bunker.

Los equipos principales de este tipo de central son:

- turbina
- caldera
- generador.

Figura 2. **Esquema de una central térmica**

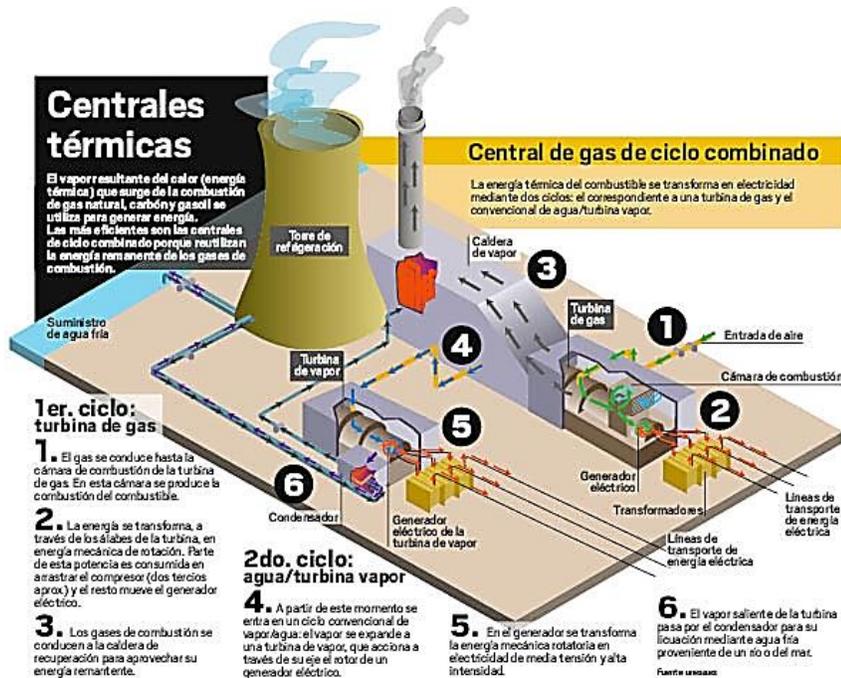


Fuente: [http://www.nuclenor.org/aula/222\\_07/capitulo8.htm](http://www.nuclenor.org/aula/222_07/capitulo8.htm).

#### 7.1.4. **Centrales térmicas de ciclo combinado**

Son instalaciones que utilizan gas natural como combustible y reutilizan la energía remanente de los gases de combustión. En este tipo de centrales térmicas, la generación eléctrica se realiza mediante dos ciclos termodinámicos utilizando para ello dos tipos de turbina: una de gas y otra de vapor. En el primer ciclo, conocido como Brayton, se utiliza gas natural, el cual es quemado en una cámara de combustión y los gases de combustión se inyectan hacia los alabes de la turbina de gas, donde se transforma la energía calorífica en energía mecánica de rotación para accionar el generador eléctrico. En segundo ciclo, conocido como Rankine, se aprovechan los gases del primer ciclo, los cuales son conducidos a una caldera de recuperación, en donde se utilizan para producir vapor de agua. El vapor producido se inyecta y se expande en una turbina de vapor para generar energía mecánica rotacional que acciona un segundo generador eléctrico (<http://www.unesa.es/sector-electrico/funcionamiento-de-las-centrales-el%C3%A9ctricas/1343-central-ciclo-combinado>).

Figura 3. Central térmica de ciclo combinado



Fuente: <https://equipo12fuentes.files.wordpress.com/2012/02/dasd.jpg>

### 7.1.5. Centrales nucleares

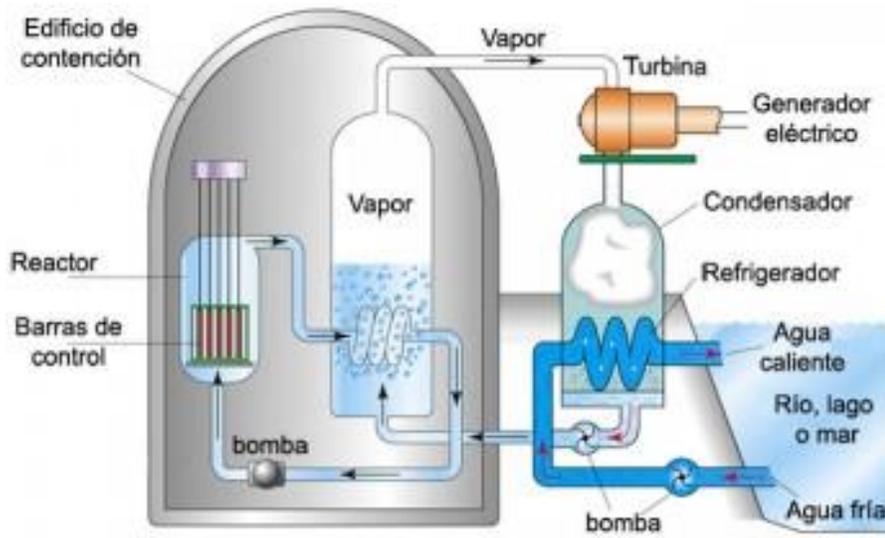
Una central térmica nuclear aprovecha el calor que se obtiene de la fisión de los núcleos de uranio para la producción de energía eléctrica. Este tipo de central posee un reactor para iniciar y controlar una reacción en cadena de fisión nuclear que produce calor, el cual se utiliza, por medio un ciclo termodinámico convencional, para accionar un alternador o generador y así transformar la energía mecánica en energía eléctrica (<http://www.unesa.es/sector-electrico/funcionamiento-de-las-centrales-electricas/1349-central-nuclear>).

- Funcionamiento básico de una central nuclear

La energía se obtiene del núcleo de átomos por medio de su división (fisión nuclear). Los átomos tienen unos enlaces internos que unen sus subpartículas (electrones, neutrones y protones), y al dividirse, los enlaces se rompen y desprenden la energía interna de enlace del interior del átomo que unía las partículas separadas. La fisión nuclear es provocada de manera artificial y controlada, a un átomo de un elemento químico de grandes dimensiones se le dispara un neutrón, una pequeña partícula a una cierta velocidad, que rompe el átomo (rompiendo su núcleo, formado por neutrones y protones enlazados entre ellos por enlaces muy energéticos) en una reacción nuclear exotérmica, generando energía térmica en forma de calor. (<http://www.unesa.es/sector-electrico/funcionamiento-de-las-centrales-electricas/1349-central-nuclear>).

Es necesario que las reacciones nucleares sean en cadena para obtener una mayor energía que la utilizada. Para poner en marcha la reacción nuclear en cadena se necesita mucha energía, pero ya iniciada la reacción, no se necesita tanta energía para mantenerla, y llega un momento en el que la energía obtenida es superior a la energía utilizada. Para lograr esto es necesario que el elemento químico pesado sea radiactivo. El elemento frecuentemente utilizado es un isótopo del uranio. Las reacciones en cadena tienen lugar en el núcleo del reactor nuclear. Posteriormente, un circuito de tubos por los que circula un fluido llamado refrigerante se encarga de transportar el calor (energía térmica) fuera del depósito enfriándolo. (<https://energia-nuclear.net/definiciones/central-nuclear.html>).

Figura 4. **Esquema de funcionamiento de una central nuclear**

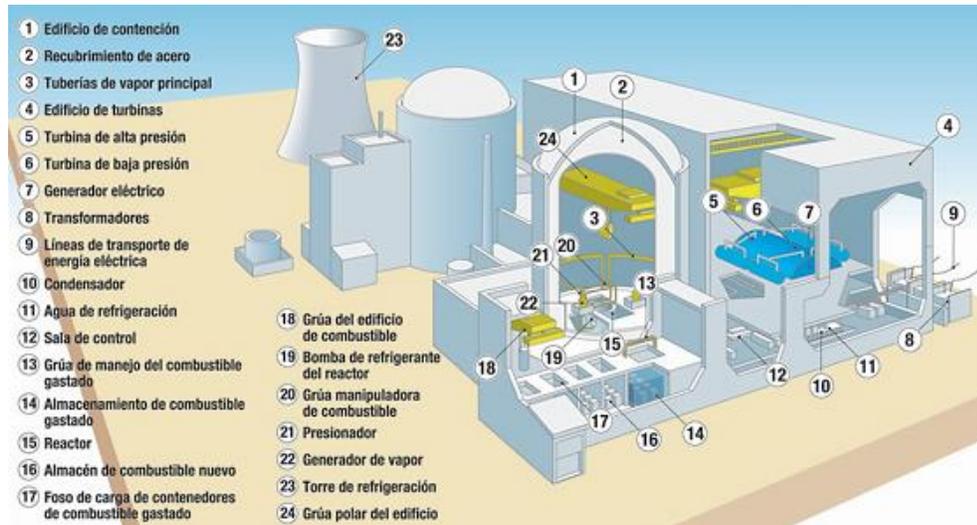


Fuente: <https://energia-nuclear.net/definiciones/central-nuclear.html>.

Los principales componentes de una central nuclear son:

- edificio de contención blindado y hermético
- reactor
- generadores de vapor
- presionador
- bombas del refrigerante.

Figura 5. Central térmica nuclear

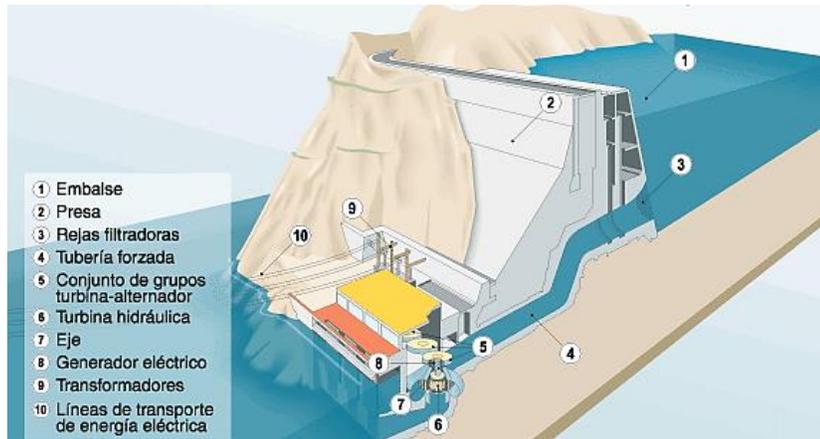


Fuente: <http://www.unesa.es/sector-electrico/funcionamiento-de-las-centrales-electricas/1349-central-nuclear>.

### 7.1.6. Centrales hidroeléctricas

Este tipo de centrales aprovecha la energía potencial y/o cinética del agua de los ríos, creando un embalse para retener el agua por medio de la construcción de una presa. La masa de agua embalsada es conducida, a través de una tubería, transformando su energía potencial en energía cinética, hacia una turbina para mover los alabes los cuales generan un movimiento rotacional de su eje que acciona un generador o alternador el cual produce la energía eléctrica (Juárez, 1992).

Figura 6. **Esquema de una central hidroeléctrica**



Fuente: <http://www.unesa.es/sector-electrico/funcionamiento-de-las-centrales-electricas/1347-central-hidroelectrica>.

Las centrales hidroeléctricas, dependiendo del régimen de flujo del agua, se clasifican en:

- Centrales de agua fluyente: no cuentan con reserva de agua, aprovecha el agua disponible en cada momento. Son centrales de gran caudal y poco salto, y son construidas en el propio cauce del río.
- Centrales hidroeléctricas de reserva o embalse: utiliza un embalse por medio de la construcción de una presa para almacenar un volumen grande de agua y gradúa el caudal que se envía a la turbina.
- Centrales de bombeo o reversible: posee dos embalses situados a diferente nivel, cuando la demanda de energía es alta, trabaja como una central convencional, es decir el agua cae desde el embalse superior para hacer girar la turbina y posteriormente queda almacenada en el

embalse inferior. Cuando la demanda de energía eléctrica es baja, el agua del embalse inferior es bombeada al embalse superior para realizar el ciclo productivo ([http://www.endesaeduca.com/Endesa\\_educa/recursos-interactivos/produccion-de-electricidad/xi.-las-centrales-hidroelectricas](http://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/produccion-de-electricidad/xi.-las-centrales-hidroelectricas)).

Figura 7. **Esquema de una central hidroeléctrica de bombeo**



Fuente: <http://www.unesa.es/sector-electrico/funcionamiento-de-las-centrales-electricas/1342-central-bombeo>

### 7.1.7. Centrales solares

Son instalaciones que aprovechan la energía solar para la generación de energía eléctrica, mediante un proceso fototérmico (centrales termosolares) o de un proceso fotovoltaico (centrales solares fotovoltaicas).

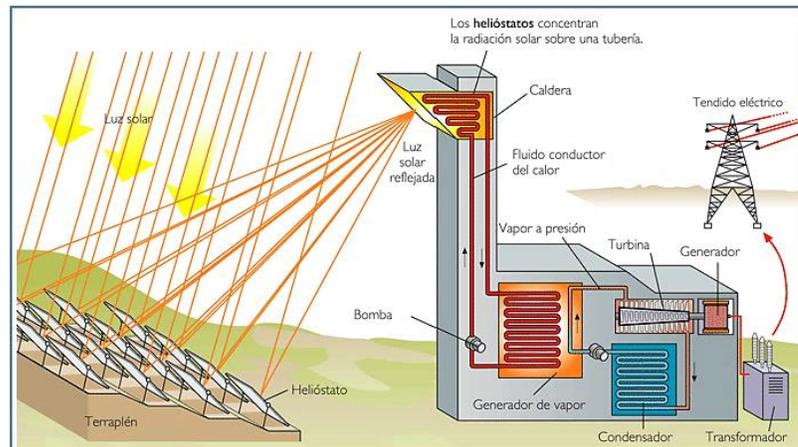
- Centrales termosolares

Son centrales solares que utilizan el proceso fototérmico parecido al de un ciclo térmico de las centrales térmicas convencionales (ciclo termodinámico de agua-vapor). El calor de la radiación calienta agua para producir vapor el cual es conducido hacia la turbina, donde se transforma la energía calorífica en energía mecánica rotatoria con la se acciona un generador o alternador para producir la electricidad. La captación y concentración de la radiación solar se realiza, mediante dispositivos llamados heliostatos o espejos direccionales que siguen en forma automática la variación de la orientación del sol. (Carta, Calero y Roque, 2009).

Existen varios tipos de centrales termosolares, pero las más importantes son:

- Central solar de torre central: Contiene un conjunto de espejos direccionales o heliostatos que captan y reflejan la radiación solar a un receptor y en cuyo interior circula un fluido que al calentarse transfiere el calor a una caldera para la producción de vapor necesario para hacer mover la turbina.

Figura 8. **Esquema central solar de torre central**



Fuente: [https://sites.google.com/site/bohiotecnologia/\\_/rsrc/1371134061764/secador-de-manos/centrales-termosolares/edyelloco.png](https://sites.google.com/site/bohiotecnologia/_/rsrc/1371134061764/secador-de-manos/centrales-termosolares/edyelloco.png)

Figura 9. **Central solar de torre central en Sanlúcar la Mayor (Sevilla)**

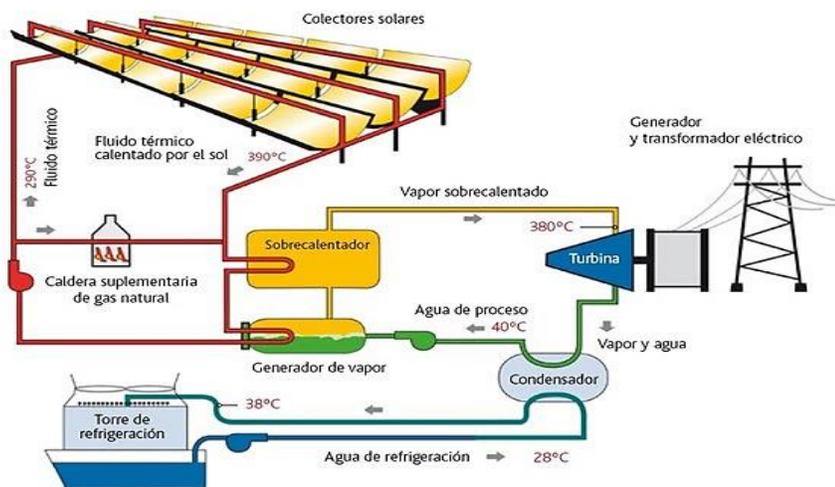


Fuente:

[https://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa\\_solar#/media/File:PS10\\_solar\\_power\\_tower.jpg](https://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_solar#/media/File:PS10_solar_power_tower.jpg)

- Central solar de colectores distribuidos: Este tipo de central hace uso de colectores cilíndrico-parabólicos que concentran la radiación solar en un tubo central, por el cual circula un fluido (aceite térmico) que se calienta a unos 300 grados Celsius y que es conducido a una caldera para producir vapor, el cual es utilizado para hacer girar la turbina y convertir la energía calorífica en energía mecánica rotacional necesaria para accionar un generador de energía eléctrica.

Figura 10. **Esquema central termosolar colectores cilíndrico-parabólicos**



Fuente: <http://www.gmdsol.com/blog/wp-content/uploads/2015/07/esquema-termsolar-concentrador-masqueingenieriadotcom.jpg>

Figura 11. **Espejos cilíndrico-parabólicos en una central térmica solar**

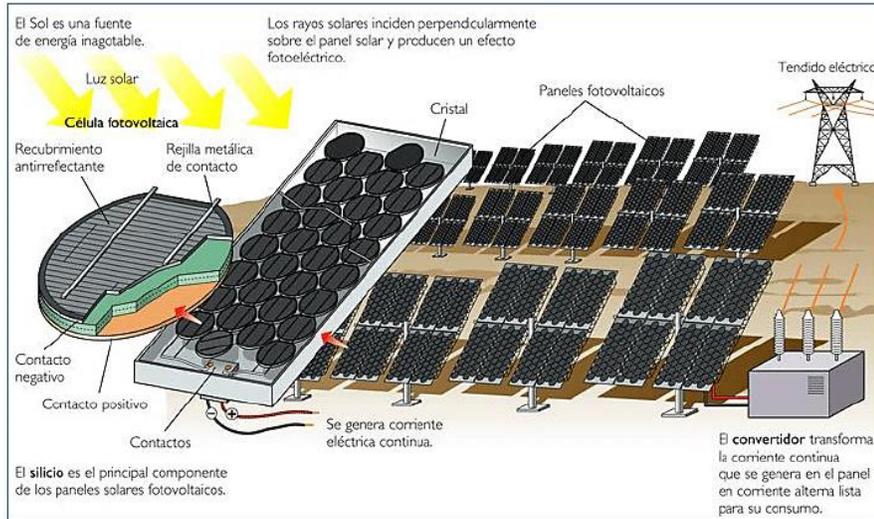


Fuente: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d7/Solar\\_Array.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d7/Solar_Array.jpg).

- **Centrales solares fotovoltaicas**

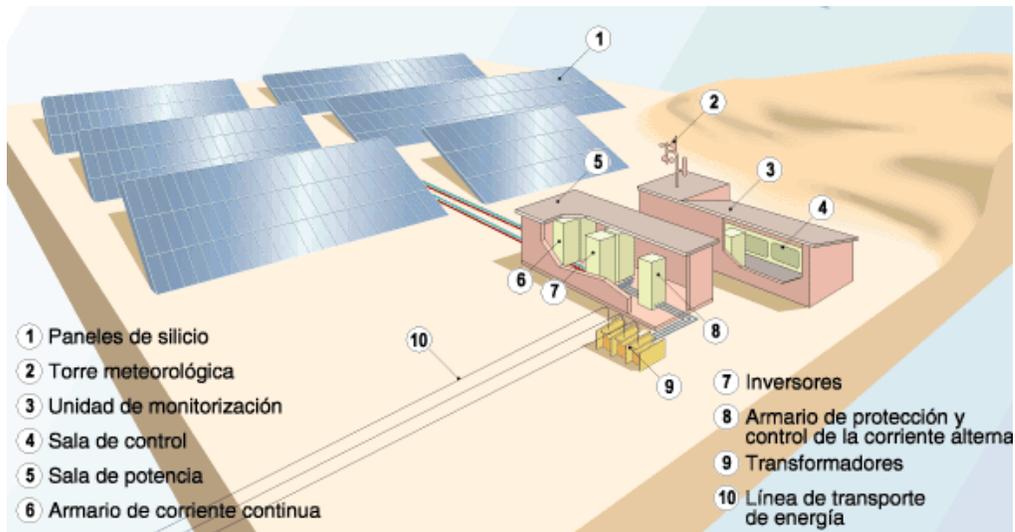
En este tipo de centrales solares la captación de la radiación solar se realiza empleando un conjunto de células fotovoltaicas, que convierten la energía solar en energía eléctrica continua, mediante el efecto fotoeléctrico. Las células fotovoltaicas están integradas en módulos que forman los paneles o placas fotovoltaicas. La energía continua generada es conducida a un armario de corriente continua en donde se convierte a corriente alterna por medio de un inversor o convertidor de corriente. Luego de la conversión a corriente alterna, se conduce a un armario de corriente alterna, y posteriormente se transporta a un centro de transformación, donde se adapta la corriente a las condiciones de intensidad y tensión de las líneas de transporte de la red eléctrica ([http://www.endesaeduca.com/Endesa\\_educa/recursos-interactivos/produccion-de-electricidad/xii.-las-centrales-solares](http://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/produccion-de-electricidad/xii.-las-centrales-solares)).

Figura 12. Esquema de paneles fotovoltaicos



Fuente: <http://www.edu.xunta.gal/centros/iesfelixmuriel/system/files/La%20Energ%C3%ADa.pdf>.

Figura 13. Esquema de una central solar fotovoltaica



Fuente: <http://www.unesa.es/sector-electrico/funcionamiento-de-las-centrales-electricas/1345-central-fotovoltaica>

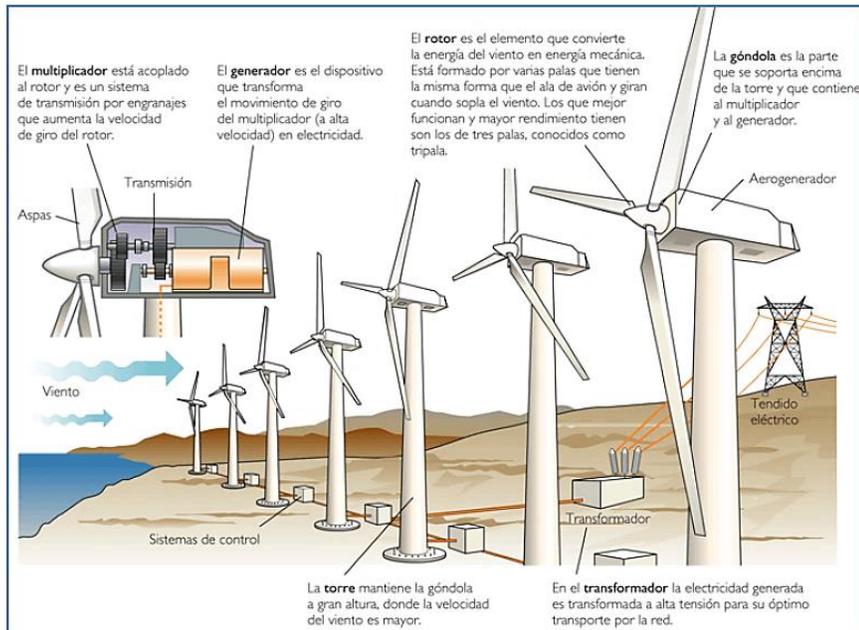
### **7.1.8. Parques eólicos**

Una central eólica es una instalación donde se produce energía eléctrica, a partir de la energía cinética del viento por medio de aerogeneradores que aprovechan las corrientes de aire. La agrupación de varios aerogeneradores en una misma ubicación conforma lo que es un parque eólico.

- Funcionamiento de una central eólica

Un factor importante para la generación de energía eléctrica es la velocidad del viento, debe de estar en el rango de 3 a 25 m/s. Sobre una torre se coloca una góndola, que aloja un generador que está conectado a un conjunto de aspas por medio de un multiplicador. El viento hace girar las aspas, las cuales transfieren el movimiento rotacional al generador que produce la energía eléctrica. La energía eléctrica generada se conduce por medio de cables conductores a un centro de control, donde se eleva su tensión por medio de transformadores, para luego ser inyectada a la red general.

Figura 14. Esquema de un parque eólico



Fuente: <http://www.edu.xunta.gal/centros/iesfelixmuriel/system/files/La%20Energ%C3%ADa.pdf>

### 7.1.9. Centrales de biomasa

Una central de biomasa es una instalación que produce energía eléctrica, a partir de recursos biológicos (biomasa), es decir utiliza fuentes renovables. La energía eléctrica se puede producir por combustión o gasificación.

- Biomasa

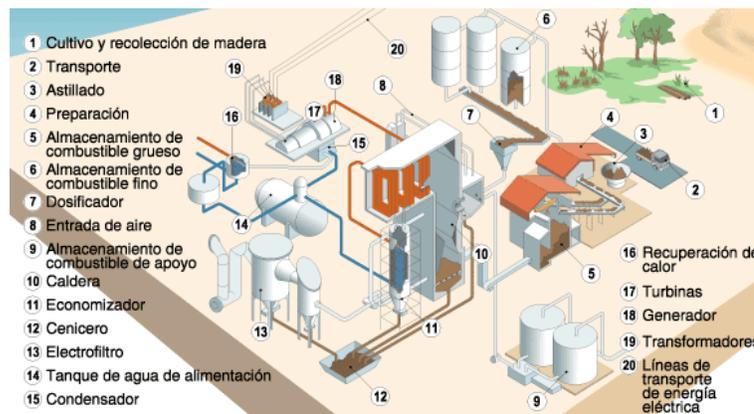
La biomasa es una fuente de energía renovable que procede de materiales orgánicos, por lo regular de origen forestal y agrícola, y de residuos de origen animal y humano.

Definición de biomasa, según la Especificación Técnica Europea CEN/TS 14588: “Todo material de origen biológico excluyendo aquellos que han sido englobados en formaciones geológicas sufriendo un proceso de mineralización”.

- **Funcionamiento de una central de biomasa**

El combustible, la biomasa, es transportado a las instalaciones de la central eléctrica y se somete a un tratamiento de astillado para reducir su tamaño, luego se clasifica de acuerdo con el tamaño y procede a su almacenamiento. El siguiente paso consiste en transportar la biomasa a la caldera para su combustión y producción de vapor de agua, el cual se inyecta a una turbina de vapor que transmite energía rotacional a un generador o alternador donde se produce la energía eléctrica. Este tipo de central eléctrica utiliza un ciclo termodinámico agua-vapor al igual que las otras centrales térmicas convencionales (<http://www.unesa.es/sector-electrico/funcionamiento-de-las-centrales-electricas/1341-central-biomasa>).

Figura 15. **Esquema de una central eléctrica de biomasa**



Fuente: <http://www.unesa.es/sector-electrico/funcionamiento-de-las-centrales-electricas/1341-central-biomasa>.

### 7.1.10. Generación de energía eléctrica en Guatemala

De acuerdo con la información proporcionada por el Ministerio de Energía y Minas (julio 2017) la capacidad instalada al mes de junio de 2017 era 4,204.90 MW de potencia distribuida de la siguiente forma:

Tabla I. **Capacidad instalada del parque generador**

<b>Capacidad Instalada del Parque Generador Sistema Nacional Interconectado -SNI- a Junio 2017</b>		
<b>Tipo de Central</b>	<b>Potencia en MW</b>	<b>%</b>
Hidroeléctricas	1,417.0	33.7
Ingenios Azucareros	1,017.9	24.2
Motores de C.I.	711.2	16.9
Turbinas de Vapor	584.7	13.9
Turbinas de Gas	250.9	6.0
Solar Fotovoltaica	91.0	2.2
Eólicas	75.9	1.8
Geotérmicas	49.2	1.2
Biogás	7.2	0.2
<b>Total</b>	<b>4,204.9</b>	<b>100</b>

Fuente: elaboración propia.

- Matriz de generación

La generación de energía eléctrica en Guatemala, por tipo de combustible, hasta junio del año 2017, era la siguiente:

Tabla II. **Generación por tipo de combustible a junio 2017**

<b>Combustible</b>	<b>GWh</b>	<b>%</b>
Geotérmica	139.73	2.46
Eólica	91.51	1.61
Solar	98.48	1.74
Hidroeléctrica	1,914.83	33.75
Biogás	6.61	0.12
Biomasa	1,164.69	20.53
Carbón Mineral	2,019.30	35.59
Bunker	235.00	4.14
Diesel	4.05	0.07
<b>Total</b>	<b>5,674.20</b>	<b>100.00</b>

Fuente: elaboración propia.

## 7.2. Carbón mineral

El carbón o carbón mineral es una roca sedimentaria de color negro rica en carbono y es utilizado como combustible fósil, ampliamente utilizado para la generación de energía eléctrica. El carbón suministra el 25 % de la energía primaria consumida en el mundo, solo por detrás del petróleo.

Las principales aplicaciones del carbón son:

- Generación de energía eléctrica
- Coque
- Siderurgia
- Industrias varias
- Uso doméstico
- Carboquímica

- Petróleo sintético
- Mercado Internacional

Existen tres grandes mercados de carbón:

- Asiático: abastecido principalmente por Australia, Indonesia, Canadá, Sudáfrica y China.
- Europeo: abastecido por Sudáfrica, Colombia, Australia, Estados Unidos, Polonia y Rusia.
- Estadounidense: se autoabastece por poseer reservas propias, y también es abastecido por Colombia.

El carbón se transporta por carretera, ferrocarril o vía fluvial desde las minas hasta los puertos de embarque, y se envía a 200 puertos que se dedican a esta actividad, siendo los principales los que se conocen como ARA (Ámsterdam, Rotterdam y Antwerp), considerados como la principal puerta de entrada de carbón a Europa. Se pueden mencionar otros puertos de embarque de carbón como: Glandstone, Queensland de Australia, Richards Bay en Sudáfrica, Qinhaungdo de China y Puerto Bolívar en Colombia.

El carbón se puede negociar por medio de contrato de largo plazo por períodos de hasta cinco años o contratos de corto plazo. Los contratos a corto plazo surgieron en los años 90 y su negociación por lo regular es flexible, debido al precio, que está controlado por ciertas variables: relación oferta-demanda, tipo carbón, calidad, cantidad y costos de transporte hasta el puerto de embarque.

### **7.2.1. Clasificación de carbón mineral**

El carbón mineral se divide en:

- **Antracita:** contiene pocas impurezas y más contenido en carbono, además posee un contenido bajo de materias volátiles y su combustión es muy limpia. Su color es negro brillante y extrema dureza.
- **Hulla:** se formó como resultado de la compresión del lignito, tiene un poder calorífico y calidad inferior a la antracita, contiene entre un 80 y 90 % de carbono. Es el tipo de carbón con más abundancia. Posee un mayor poder calorífico, menor contenido en volátiles y humedad que el lignito.
- **Lignito:** comúnmente es de color café y presenta una estructura fibrosa, su formación se da de la compresión de la turba. Es un combustible de calidad media, posee un contenido entre el 60 a 75 % de carbono y tiene un poco poder calorífico mayor al de la hulla y menor al de la turba.
- **Turba:** también conocido como carbón pardo, se caracteriza por ser esponjoso y ligero. Contiene la proporción más baja de carbono y posee un alto índice de humedad, y produce una cantidad considerable de cenizas al ser quemado (<http://www.uciencia.uma.es/Coleccion-cientifico-tecnica/Mineralogia/Galeria>).

### **7.3. Cadena de suministro y de valor del carbón mineral**

Las actividades o pasos que componen la cadena suministro del carbón desde el productor hasta el consumidor son:

- Exploración
- Explotación y producción
- Beneficio
- Transformación
- Transporte
- Comercialización
- Intermediario

Exploración: etapa inicial de la cadena y consiste en la búsqueda del yacimiento carbonífero valorando las condiciones geológicas (potencialidad y calidad).

Explotación y producción: Esta etapa se da después de la exploración cuando se han obtenido resultados factibles económicamente hablando, y se divide en: desarrollo-montaje (vías de acceso, obras de infraestructura, servicios a la mina), preparación (delimitación de áreas dentro del yacimiento, bancos, niveles, subniveles, tambores, etc.), perforación, tronadura y se finaliza con el arranque, extracción o producción en mina.

Beneficio: conjunto de actividades y operaciones que se necesitan así mejorar las condiciones físicas del carbón para adecuarlo a determinados usos y transportarlo de mejor forma. En esta etapa se incluyen varios procesos:

- Separación: división de carbones con cualidad diferentes que se disponen en mantos o vetas contiguas, generalmente se realiza dentro la mina.

- Selección o clasificación manual: sustracción manual de rocas adyacentes, intercalaciones al manto o impurezas que pueda contener el carbón al ser extraído de la mina.
- Trituración y quebrantamiento: consiste en reducir el tamaño de los fragmentos del carbón extraído (clasificación por tamaño), lo cual ayuda para su transporte y a cumplir con los requerimientos del mercado. En esta etapa se utilizan equipos mecánicos como trituradoras de mandíbula y martillo (compresión, rodadura, impacto, fricción, desgaste o rozamiento).
- Tamizado o clasificación por tamaño: se clasifica el carbón por medio de mallas o tamices controlando el paso del carbón, según su tamaño.
- Lavado: disminución de la cantidad de cenizas e impurezas, con el fin de minimizar los impactos ambientales derivados a la combustión del carbón. El lavado puede ser en húmedo (según tamaño y forma) o en seco (según diferencias en densidad y fricción).
- Secado: disminución de la humedad por medio de calentamiento mecánico.
- Mezcla de carbones: combinación y homogenización de carbones con diferentes propiedades, con el fin de cumplir con los requisitos del mercado.
- Transporte interno a patios de acopio: movilización del carbón desde la mina hasta los patios de acopio, se utilizan camiones de volteo de 10

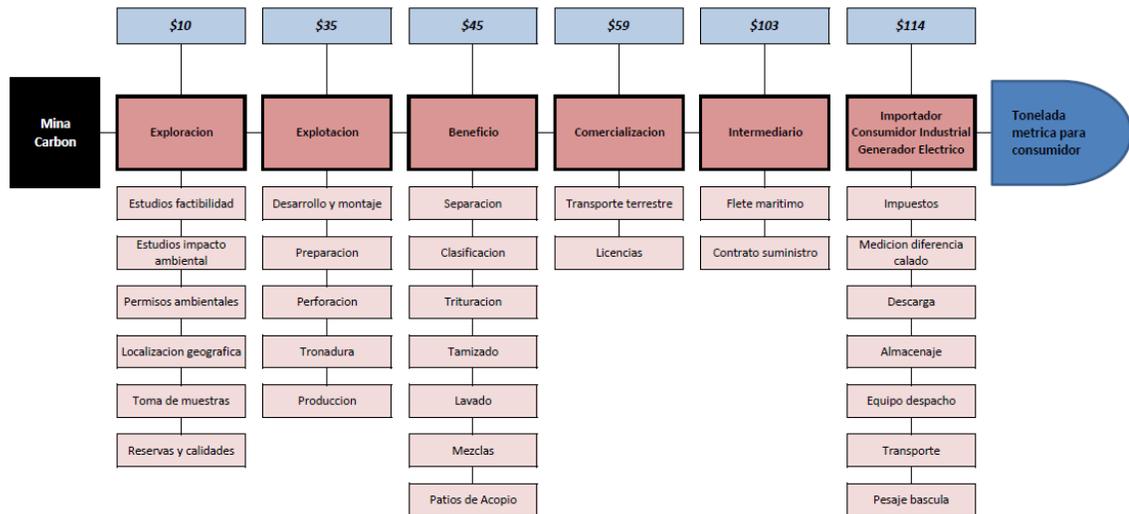
toneladas, dobletroques de 20 toneladas, tractomulas de 40 toneladas, bandas transportadoras, cables aéreos y vías férreas.

Comercialización y exportación: consiste en la transacción compra-venta que se realiza entre el productor e intermediario e incluye: licencias de exportación, facturación, transporte terrestre de mina a puerto de embarque y almacenaje patio de acopio en puerto.

Intermediario (distribución): empresa que se encarga de realizar la distribución y traslado del carbón desde el puerto de embarque hasta el puerto destino, es el enlace entre el productor y el consumidor final. Ejemplo, la empresa TRAFIGURA, es una empresa que comercializa materias primas a nivel mundial y sus actividades de comercialización incluye: petróleo y derivados, metales y minerales, transporte y fletamento.

Importación: trámites que se realizan para internar el carbón en el país consumidor, donde se incluye: pago impuestos, medición diferencia calado, análisis control de calidad, descarga, almacenaje en patios de acopio, despacho y transporte a planta o consumidor y pesaje al ingreso a instalaciones del consumidor.

Figura 16. **Diagrama cadena de suministro y de valor del carbón mineral para una empresa generadora de electricidad**



Fuente: elaboración propia.

#### 7.4. Lean Sigma

Lean Sigma es una metodología que tiene una influencia muy importante en la mejora de procesos y en la solución de problemas que enfrentan las organizaciones. Esta metodología puede ser aplicada en todo tipo de empresas no importante el tamaño de la organización, con el objetivo de optimizar los recursos, agregar valor y reducir los tiempos y costos de los diferentes procesos, y así incrementar la satisfacción del cliente (Felizzola, 2014).

La metodología Lean Sigma toma las características de manufactura esbelta (Lean) y de Six Sigma y las integra para formar una serie de siete principios fundamentales. Los siete principios de Lean Six Sigma son:

- Enfoque en el cliente
- Identificar y entender cómo se realiza el trabajo
- Gestionar, mejorar y suavizar el flujo del proceso
- Eliminar el desperdicio y pasos que no agregan valor
- Gestionar por hechos y reducir la variación
- Involucrar y equipar a las personas en el proceso
- Empezar una actividad de mejora en forma sistemática (Morgan, 2012).

#### **7.4.1. Gestión y mejora de procesos**

La gestión de procesos de negocio es una disciplina de gestión, cuyo objetivo es mejorar el desempeño, productividad y optimización de los procesos de negocio de una organización por medio de la gestión de los procesos que se deben de diseñar, modelar, organizar, documentar y optimizar de forma continua.

##### **7.4.1.1. Productividad**

La productividad es la relación entre producción e insumos o recursos utilizados para la producción, este término puede utilizarse para medir el grado en que se extrae cierto producto de un insumo, es decir, el valor agregado (OIT, 1996).

La productividad tiene relación con la mejora continua y van en relación con los estándares de calidad. El concepto de productividad involucra dos componentes: eficiencia y eficacia. La eficiencia es la relación entre el resultado alcanzado y los recursos utilizados. La eficiencia busca la optimización de los recursos y el evitar los desperdicios. La eficacia es la capacidad de realizar las

actividades planeadas, de lograr un efecto o resultado esperado. La unión de estos dos conceptos da por resultado la efectividad, que es la utilización mínima de recursos para realizar una actividad y lograr el resultado esperado en el menor tiempo posible.

Figura 17. **La productividad y sus componentes**

Productividad: mejoramiento continuo del sistema.  
Más que producir rápido, producir mejor.  
Productividad = eficiencia x eficacia

$$\frac{\text{Unidades producidas}}{\text{Tiempo total}} = \frac{\text{Tiempo útil}}{\text{Tiempo total}} \times \frac{\text{Unidades producidas}}{\text{Tiempo útil}}$$



Fuente: Gutiérrez (2009).

La productividad de una empresa, según Bain (1985) puede verse afectada por varios factores externos o internos de los cuales se pueden mencionar:

- Factores externos, son aquellos que la organización no tiene control de ellos, por ejemplo: reglamentación gubernamental, tributación, aranceles aduaneros, disponibilidad de materias primas y mano de obra calificada, infraestructura existente, disponibilidad de capital y tipos de interés.
- Factores internos, estos son generados dentro de la empresa, por lo tanto, tienen control de ellos, de los cuales se pueden citar: recurso

humano, diseño de producto o sistema, energía, materiales, terrenos y edificios, métodos de trabajo, maquinaria y equipo.

La agrupación y utilización de los factores mencionados determina la productividad de una organización.

#### **7.4.1.2. Mejora de la productividad**

La mejora de la productividad se puede decir que se da cuando se incrementa la misma, este incremento de productividad tiene un efecto positivo en la rentabilidad de la empresa, con lo cual se incrementa la producción y se reducen los costos.

Tomando en cuenta que la productividad es la relación entre salidas y entradas (salidas / entradas), donde las salidas es el producto o servicio, y las entradas son mano de obra, materias primas, maquinaria, energía, capital y tiempo, la productividad se puede mejorar si se obtiene:

- Una mayor salida con las mismas entradas, mayor producción utilizando la misma cantidad de recursos.
- Misma salida con menores entradas, misma producción utilizando menos recursos.
- Incremento de las salidas con menores entradas, mayor producción utilizando menos recursos.

La mejora de la productividad se puede dar si se toman los siguientes aspectos:

- Mejoras en tecnología, organización, recursos humanos, relaciones laborales, condiciones de trabajo, calidad.
- Implantación de tecnologías de la información y la comunicación.
- Evitar o reducir desperdicios.
- Implementación de metodología manufactura esbelta y seis sigma.
- Optimización en el uso de los recursos.
- Utilización de metodología de mejora continua de procesos.
- Reducción de tiempos de paro.

#### **7.4.1.3. Medición de la productividad**

Si se pretende mejorar la productividad es necesario la medición de esta, con esta medición se puede analizar las debilidades y fortalezas de la organización y permite evaluar el desempeño de la empresa, además de tener una base para medir el cambio.

Para la medición de la productividad es necesario contar con índices o indicadores. Los indicadores son variables que ayudan a identificar algún defecto o desviación de un proceso, producto o servicio, reflejan la eficiencia en el uso de los recursos. Los indicadores se pueden utilizar para comparar la productividad de la empresa con la competencia. Existen varios indicadores, de los cuales se pueden mencionar:

- Producción
  - Productividad de la mano de obra: la cantidad de productos fabricados con respecto al recurso humano, unidades producidas / número de trabajadores.
  - Productividad del costo de mano obra directa: la cantidad de productos fabricados con respecto al costo del recurso humano, unidades producidas / costo total mano de obra.
  
- Inventarios
  - Rotación de mercancía: Número de veces que el capital invertido se recupera, a través de las ventas.
  - $$(Ventas\ acumuladas / Inventario\ promedio) = No.\ de\ veces$$
  - Duración del inventario: Cuantas veces dura el inventario que se tiene.
 
$$(Inventario\ final / Ventas\ promedio) \times 30\ días$$
  - Antigüedad del inventario: Nivel de mercancías no disponibles, debido a obsolescencia, deterioro, mal estado, vencimientos.
 
$$(Unidades\ dañadas + obsoletas + vencidas) / Unidades\ disponibles\ inventario$$
  - Valor económico del inventario: Porcentaje del costo del inventario físico dentro del costo de venta.

Costo venta del mes / Valor inventario físico

- Exactitud de inventarios: Mide el número de códigos que presentan diferencias con respecto al inventario teórico al realizar un conteo físico.

$(\text{Valor diferencias en moneda} / \text{valor total inventario}) \times 100$

- Transporte y distribución

- Costo de transporte contra venta: controlar rubro costo transporte respecto a las ventas generadas.

$(\text{Costo transporte} / \text{valor ventas}) \times 100$

- Costo por kilómetro: controlar el costo incurrido por cada kilómetro recorrido.

$\text{Costo total de transporte} / \text{kilómetros totales recorridos}$

- Costo operativo por conductor: conocer el costo por cada conductor. Periodicidad mensual.

$(\text{Costo total transporte} / \text{No. de conductores})$

- Comparativo costo de transporte: Costo transportar una unidad respecto a un transporte tercerizado. Periodicidad mensual.

Costo transporte propio por unidad / Costo contratar transporte por unidad

- Entregas perfectas: Cantidad de órdenes que se atienden en forma perfecta (completa, en el tiempo estipulado, documentación completa y exacta, mercadería en condiciones perfectas, presentación y transporte adecuado).

Pedidos entregados perfectos / total de pedidos entregados.

- Financieros

- Margen bruto: Las ventas que porcentaje de utilidades brutas generan, cada dólar vendido cuanto genera en utilidad bruta.

Margen bruto de utilidad =  $(\text{utilidad bruta} / \text{ventas netas}) \times 100$

- Margen operacional: Las ventas que porcentaje de utilidades operacionales generan, cada dólar vendido, cuánto genera en utilidad operacional.

Margen oper. de utilidad =  $(\text{Utilidad operacional} / \text{ventas netas}) \times 100$

- Margen neto: Las ventas que porcentaje de utilidades netas generan, cada dólar vendido cuanto genera en utilidades netas.

Margen neto de utilidad =  $(\text{Utilidad neta} / \text{ventas netas}) \times 100$

- Rendimiento del patrimonio: Cuál es el rendimiento que los socios o dueños de la empresa obtienen sobre su inversión.

$$\text{Rendimiento del patrimonio} = (\text{Utilidad neta} / \text{Patrimonio}) \times 100$$

- Rendimiento del activo total: Mide la capacidad del activo para producir utilidades, no importando como haya sido financiado, con deuda o patrimonio, cada dólar invertido en activo total cuanto genera en utilidad neta.

$$\text{Rendimiento del activo total} = (\text{Utilidad neta} / \text{activo total bruto}) \times 100$$

- Mantenimiento

- Eficiencia global de equipos: relaciona tres factores de funcionamiento de un equipo, la disponibilidad (tiempos muertos), eficiencia (capacidad real) y calidad (producción de unidades defectuosas).

$$\text{OEE} = \text{disponibilidad} \times \text{eficiencia} \times \text{calidad}$$

- Disponibilidad total: es la relación entre el tiempo que un equipo ha estado disponible y el tiempo total de un período:

$$\text{Disponibilidad} = \frac{\text{Horas totales} - \text{Horas de paro por mantenimiento}}{\text{Horas totales}}$$

#### **7.4.2. Lean manufacturing o manufactura esbelta**

La manufactura esbelta es una metodología de mejora de la eficiencia de procesos productivos y se basa en el Sistema de Producción Toyota desarrollado por los japoneses Taiichi Ohno. El Sistema de Producción Toyota (SPT) es un sistema integral de producción y gestión que surgió en la fábrica japonesa de automóviles Toyota, fue diseñado para fábricas de automóviles y sus relaciones con proveedores y consumidores, y en un principio se llamó Producción Justo a Tiempo (Liker, 2006).

La metodología de manufactura esbelta se enfoca en el flujo de los procesos y en eliminar las actividades que no agregan valor y que entorpecen el flujo. Las actividades que no agregan valor, pero que generan costos se les conoce como desperdicio o muda. Existen siete tipos de desperdicio:

- Sobreproducción
- Esperas
- Transportación
- Sobreprocesamiento
- Inventarios
- Movimientos
- Reprocesos o retrabajos

Algunos autores agregan un octavo desperdicio, el talento humano, por la razón que no se aprovecha el uso de las habilidades del recurso humano para aumentar el rendimiento de los procesos (Gutiérrez, 2009).

Tabla III. **Tipos de desperdicio, síntomas, posibles causas e ideas y herramientas para eliminarlas**

<b>Tipo de desperdicio</b>	<b>Síntomas</b>	<b>Posibles causas</b>	<b>Ideas y Herramientas</b>
<b>Sobreproducción</b> Producir mucho o más pronto de lo que necesita el cliente	Se producen muchas partes y/o se producen con mucha anticipación Las partes se acumulan incontroladamente en inventarios Tiempo del ciclo extenso Tiempos de entrega pobres	Mucho tiempo para adaptar el proceso para que produzca otro modelo o parte Tamaño grande de lotes Pobre programación de la producción o de las actividades Desbalance en el flujo de materiales	Justo a tiempo SMED Reducir tiempos de preparación, sincronizar procesos, haciendo solo lo necesario
<b>Esperas</b> Tiempo desperdiciado (de máquinas o personas), debido a que durante ese tiempo no hubo actividades que le agregaran valor al producto	Trabajadores en espera de materiales, información o de máquinas no disponibles Operadores parados y viendo las máquinas producir Grandes retrasos en la producción	Tamaño de lote grande Mala calidad o malos tiempos de entrega de los proveedores Deficiente programa de mantenimiento Pobre programación	Eliminar actividades innecesarias, sincronizar flujos, balancear cargas de trabajo, trabajador flexible y multihabilidades, organizar el proceso en forma Kanban
<b>Transportación</b> Movimiento innecesario de materiales y gente	Mucho manejo y movimiento de partes Daños excesivos por manejo Largas distancias recorridas por las partes en proceso Tiempos de ciclo extensos	Procesos secuenciales que están separados físicamente Pobre distribución de planta Inventarios altos La misma pieza en diferentes lugares	Procesamiento en flujo continuo, sistemas Kanban y distribución de planta para hacer innecesario el manejo/transporte
<b>Sobrepesamiento</b> Esfuerzos que no son requeridos por los clientes y que no agregan valor	Ejecución de procesos no requeridos por el cliente Autorización y aprobaciones redundantes Costos directos muy altos	Diseño del proceso y el producto Especificaciones vagas de los clientes Pruebas excesivas Procedimientos o políticas inadecuadas	Simplificar proceso y eliminar actividades y operaciones que no agregan valor
<b>Inventarios</b> Mayor cantidad de partes y materiales que el mínimo requerido para atender los pedidos del cliente	Inventario obsoletos Problemas de flujo de efectivo Tiempos de ciclo extensos Incumplimiento en plazos de entrega Muchos retrabajos cuando hay problemas de calidad	Sobreproducción Pobres pronósticos o mala programación Niveles altos para los inventarios mínimos Políticas de compras Proveedores no confiables Tamaño grande de lotes	Acortar tiempos de preparación y respuesta; organizar el proceso en forma Kanban; aplicar Justo a Tiempo
<b>Movimientos</b> Movimiento innecesario de gente y materiales dentro de un proceso	Búsqueda de herramientas o partes Excesivos desplazamientos de los operadores Doble manejo de partes Baja productividad	Pobre distribución de las celdas de trabajo, herramientas y materiales Falta de controles visuales Pobre diseño del proceso	Organización de celdas de trabajo, procesamiento de flujo continuo; administración visual
<b>Retrabajo</b> Repetición o corrección de un proceso	Procesos dedicados al retrabajo Altas tasas de defectos Departamentos de calidad o inspección muy grandes	Mala calidad de materiales Máquinas en malas condiciones Procesos no capaces e inestables Poca capacitación Especificaciones vagas del cliente	Control estadístico de procesos; mejora de procesos; desarrollo de proveedores

Fuente: elaboración propia.

- Los principios fundamentales de la manufactura esbelta son:
- Calidad perfecta a la primera
- Minimización del desperdicio
- Mejora continua
- Procesos Pull (halar)
- Flexibilidad
- Construcción y mantenimiento relaciones a largo plazo con proveedores
- Medición de manufactura esbelta

Según Gutiérrez (2010), las mediciones de un proceso con la metodología lean se da comparando la cantidad de tiempo de valor añadido contra el tiempo total del ciclo del proceso. La primera variable se refiere al tiempo en que se hacen actividades que el cliente pueda reconocer como indispensables para la manufactura de un producto o la prestación de un servicio, la segunda variable describe el tiempo total del proceso. Esta medición se conoce como eficiencia del ciclo del proceso (ECP):

$$ECP = \frac{\text{tiempo de valor añadido}}{\text{tiempo total del ciclo del proceso}}$$

#### **7.4.2.1.1. Herramientas Lean**

Las principales herramientas de la metodología manufactura esbelta son:

- Mapa de flujo de valor
- 5S: Seir-Clasificar, Seiton-Organizar, Seiso-Limpieza, Seiketsu-Estandarizar, Shitsuke-Disciplina

- Trabajo estandarizado
- Mantenimiento Productivo Total (TPM, Total Productive Maintenance)
- Justo a tiempo
- Flujo continuo
- Kaizen
- SMED

#### **7.4.3. Seis Sigma**

La filosofía Seis Sigma, según Gutiérrez (2009) es una estrategia de mejora continua de los procesos que busca mejorar el desempeño de los mismos y reducir su variación. El Seis Sigma se centra en encontrar y eliminar las causas de errores, defectos y retrasos en los procesos, se apoya en una metodología altamente sistemática y cuantitativa, y su orientación es mejorar la calidad del producto, servicio o proceso. Las áreas de acción son:

- Satisfacción del cliente
- Reducción del tiempo de ciclo
- Disminución de los defectos

El objetivo del Seis Sigma es lograr procesos con una calidad que como máximo generen 3.4 defectos por millón de oportunidades de error y se alcanza con un programa vigoroso de mejora, con el respaldo de la alta dirección de la

organización. La estrategia Seis Sigma se respalda en las herramientas y el pensamiento estadístico (Gutiérrez, 2009).

Tabla IV. **Relación entre el nivel de sigmas de un proceso y los costos de calidad**

<b>Nivel de sigmas (corto plazo)</b>	<b>Rendimiento del proceso (largo plazo)</b>	<b>PPM</b>	<b>Costos de calidad como % de las ventas</b>
1	30.90 %	690,000	NA
2	69.20 %	308,000	NA
3	93.30 %	66,800	25-40 %
4	99.40 %	6,210	15-25 %
5	99.98 %	320	5-15 %
6	99.9997 %	3.4	<5 %

Fuente: elaboración propia.

Las características o principios de Seis Sigma son:

- Liderazgo comprometido de arriba hacia abajo.
- Se apoya en una estructura directiva que incluye gente de tiempo completo.
- Orientada al cliente y enfocada en los procesos.
- Se dirige con datos.
- Se apoya en una metodología robusta.
- Se apoya en entrenamiento para todos.
- Se generan ahorros y/o aumento en ventas.
- El trabajo por Seis Sigma se reconoce.
- Es una iniciativa con horizonte de varios años.
- Se comunica.

Las etapas del Seis Sigma se apoyan en la metodología DMAMC (Evans, 2008):

- Definir el proyecto (D)
- Medir la situación actual (M)
- Analizar las causas raíz (A)
- Mejorar (M)
- Controlar para mantener la mejora (C)

#### **7.4.3.1.1. Herramientas Seis Sigma**

Las herramientas que hace uso la estrategia de Seis Sigma son las siguientes (Gutiérrez, 2010):

- Herramientas básicas para la calidad
  - Diagrama de Pareto
  - Estratificación y hojas de verificación
  - Lluvia de ideas
  - Diagrama Ishikawa
  - Diagrama de dispersión
  - Coeficiente de correlación
- Diagramas de proceso
  - Diagrama de flujo
  - Diagrama PEPSU, Proveedores-Entradas-Proceso-Salidas-Usuarios (SIPOC, Suppliers-Inputs-Process-Outputs-Customers)
  - Mapeo de procesos

- Despliegue de la función de calidad (QFD, Quality Function Deployment)
  - Sistemas poka-yoke

#### **7.4.4. Eficiencia global de equipos (OEE)**

La eficiencia de un proceso o de una maquina es la relación entre la producción real obtenida y la producción máxima, y lo que busca la eficiencia es ser productivo eliminando perdidas en los procesos. Estas pérdidas es lo que impide que se llegue a una eficiencia del 100% y se clasifican en:

- Pérdidas por disponibilidad: cuando un equipo no está disponible por paros, debido a averías, cambio de formato, falta de material y/o falta de personal.
- Pérdidas por rendimiento: cuando un equipo funciona a una velocidad menor para la que está diseñada
- Pérdidas por calidad: cuando se fabrica un producto no conforme, que no cumple con las especificaciones de calidad, esto implica que se ha consumido tiempo del equipo, también se incluye en esta pérdida el reproceso de un producto defectuoso.

EIOEE (*Overall Equipment Effectiveness*) o Eficiencia global de los equipos es un indicador que mide la eficiencia de un equipo, es la relación entre el tiempo teórico del costo de fabricación y el tiempo real que cuesta en producir.

Las características del OEE que lo hacen una buena herramienta son:

- Constituye una forma estructurada y estandarizada de conocer la eficiencia de un proceso o equipo y de las pérdidas.
- Prioriza las líneas de acción, lo que se traduce en elevar la eficiencia con los mismos recursos.
- Es una guía de acción para los grupos de mejora continua, permite evaluar de forma rápida los avances.
- Es un indicador universal, permite la comparación entre procesos totalmente distintos.

#### **7.4.4.1.1. Factores del cálculo de la eficiencia global de equipos**

El indicador OEE o eficiencia global de equipos muestra las pérdidas reales de los equipos medidas en tiempo y está compuesto por tres factores:

- Disponibilidad: mide las pérdidas de los equipos debido a paros no programados.
- Eficiencia: calcula las pérdidas por rendimiento causadas por el mal funcionamiento del equipo, el funcionamiento es menor al del diseño original.

- Calidad: calcula las pérdidas de tiempo por producir productos defectuosos y el tiempo que se utiliza para el reproceso de productos que no cumplen con las especificaciones de calidad.

#### **7.4.4.2. Cálculo de la eficiencia global de los equipos**

El indicador OEE se calcula al multiplicar los tres factores: Disponibilidad, eficiencia y calidad:

$$\text{OEE} = \text{disponibilidad} \times \text{eficiencia} \times \text{calidad}$$

- Disponibilidad: es el porcentaje del tiempo en que el equipo está operando realmente.
- 

$$\text{Disponibilidad} = \frac{(\text{TO} - \text{PP}) - \text{PNP}}{(\text{TO} - \text{PP})} \times 100$$

$$\text{TO} = \text{TFR} + \text{PNP} + \text{PP}$$

Donde:

TO = tiempo de operación

PNP = paradas no programadas

PP = paradas programadas

TFR = tiempo de funcionamiento real

- Eficiencia: mide las pérdidas por rendimiento debido al mal funcionamiento del equipo, funcionamiento a velocidades menores a las del diseño original.

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{Tiempo ideal de ciclo} \times \text{Cantidad procesada}}{\text{Tiempo de funcionamiento real TFR}}$$

- Calidad: mide las pérdidas de tiempo que se emplea en producir productos defectuosos o con problemas de calidad, es tiempo perdido, por el hecho de que el producto se debe destruir o reprocesar.

$$\text{Calidad} = \frac{\text{Piezas producidas} - \text{Rechazos}}{\text{Piezas producidas}}$$



## **8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS**

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

ÍNDICE DE TABLAS

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DE PREGUNTAS

OBJETIVO

RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO

INTRODUCCIÓN

### **1. MARCO TEÓRICO**

#### **1.1. PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA**

1.1.1. Conceptos básicos

1.1.2. Centrales eléctricas

1.1.3. Centrales térmicas

1.1.4. Centrales térmicas de ciclo combinado

1.1.5. Centrales nucleares

1.1.6. Centrales hidroeléctricas

1.1.7. Centrales solares

1.1.8. Parques eólicos

1.1.9. Centrales de biomasa

1.1.10. Generación de energía eléctrica en Guatemala

#### **1.2. Carbón mineral**

1.2.1. Clasificación del carbón del carbón mineral

- 1.3. Cadena de suministro y de valor del carbón mineral
- 1.4. Lean Sigma
  - 1.4.1. Gestión y mejora de procesos
    - 1.4.1.1. Productividad
    - 1.4.1.2. Mejora de la productividad
    - 1.4.1.3. Medición de la productividad
  - 1.4.2. Lean manufacturing o manufactura esbelta
    - 1.4.2.1. Herramientas Lean
  - 1.4.3. Seis Sigma
    - 1.4.3.1. Herramientas Seis Sigma
  - 1.4.4. Eficiencia global de equipos
    - 1.4.4.1. Factores que influyen en el rendimiento
    - 1.4.4.2. Cálculo de la eficiencia global de los equipos

## 2. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

## 3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

ANEXOS

## 9. METODOLOGÍA DE TRABAJO

La investigación por realizar es de un alcance descriptivo, de un enfoque mixto, cuantitativo y cualitativo, con un diseño no experimental y de un tipo de estudio descriptivo.

El alcance metodológico es descriptivo, debido a que se tiene la disponibilidad de documentos que respaldan los datos de eficiencias de la planta y de la caldera, lo cual permite evaluar el comportamiento y desempeño de los equipos, favoreciendo el desarrollo de la presente investigación.

El estudio tiene un enfoque cuantitativo, debido a que se estarán manejando variables numéricas para controlar los procesos, y se evaluará el comportamiento de los procesos y sus desviaciones.

El estudio tiene un enfoque cualitativo, porque se hace uso de la revisión documental en la investigación de antecedentes del problema y marco teórico relacionado.

El diseño es no experimental, considerando que no se estarán manipulando las variables, únicamente se observarán y se evaluarán las mismas para su análisis.

El tipo de estudio es descriptivo, debido a que se estará detallando información describiendo las dimensiones de las variables, además se tiene la bitácora de operaciones y de generación donde se anota información relevante de la operación de la planta.

Es de tipo transversal puesto que el estudio de investigación está delimitado en tiempo, existe una fecha de inicio y una de finalización del proyecto.

- Variables de investigación

Independientes:

- Flujo de vapor: o flujo másico de vapor, es la cantidad de vapor producido por la caldera, se expresa en lb/hora
- Presión de vapor: es la presión del vapor o fase gaseosa sobre la fase líquida, es la fuerza ejercida por unidad de área del vapor producido, se expresa en psi (lb/plg<sup>2</sup>).
- Temperatura de vapor: es la temperatura del vapor producido por la caldera expresada en grados Fahrenheit (°F).
- Paros (tiempo perdido): cantidad de tiempo que no están disponibles los equipos durante el proceso de producción.
- Consumo de carbón: es la cantidad de carbón consumido por la caldera necesario para la producción de vapor requerido, se expresa en lb/hora

Dependientes:

- Disponibilidad de planta: tiempo disponible en operación de planta sobre el tiempo programada de operación, se expresa en porcentaje.
- Factor de planta: conocido también como factor de capacidad o factor de carga, es la cantidad de energía generada durante un período sobre la energía teórica o nominal capaz de generar en el mismo período, se expresa en porcentaje.

- Disponibilidad de caldera: tiempo disponible de operación de la caldera sobre el tiempo programad de operación, se expresa en porcentaje.
- Eficiencia de equipos: razón porcentual entre la producción real y la producción ideal o nominal.
- Heat rate: es la cantidad de energía térmica necesaria para generar un MWh, se expresa en BTU/MWh.

A continuación, se presenta el cuadro con las variables definidas para alcanzar los objetivos trazados.

Tabla V. **Cuadro operativización de variables**

Objetivo	Variable	Tipo Variable	Indicador
Desarrollar una estrategia utilizando la metodología lean sigma para minimizar la presencia de humedad en el carbón mineral			
Determinar la eficiencia de la planta en la generación de energía eléctrica previo a la propuesta que se presenta en este trabajo	Eficiencia planta Disponibilidad	Cuantitativa, Dependiente, Razón	Fiabilidad de datos obtenidos Disponibilidad de planta
Evaluar los procesos y determinar cuáles deben de ser mejorados para reducir la humedad en el carbón mineral	Humedad carbon	Cuantitativa, Independiente, Razón	Resultados de cálculo de la eficiencia de los equipos
	Consumo vapor		
	Flujo vapor	Cuantitativa, Independiente, Razón	
Definir la metodología adecuada para el análisis de resultados de eficiencias de equipos, causas de ineficiencias, desperdicios o del incumplimiento de variables indicadores	Eficiencia equipos	Cuantitativa, Dependiente, Razón	Eficacia del análisis de resultados
	Paros (tiempo perdido de operación)	Cuantitativa, Independiente, Razón	Disponibilidad de caldera OEE
Evaluar en qué forma incidirá en la eficiencia de la generación eléctrica la implementación de buenas prácticas de almacenamiento, manejo y manipulación del carbón mineral en la cadena interna de suministro	Efeciencia generación	Cuantitativa, Independiente, Razón	Informe de propuestas de mejora de productividad Heat rate

Fuente: elaboración propia.

El procedimiento para cumplir con los objetivos y desarrollo de la investigación se detalla a continuación:

- Fase 1: corresponde a la revisión de documentos y datos para realizar la investigación de antecedentes del problema y marco teórico relacionado al mismo.
- Fase 2: definir y calcular el porcentaje de humedad del carbón mineral, eficiencia de generación de la planta, eficiencia de calderas y equipos, de acuerdo con las especificaciones de fabricación, utilizando los manuales y planos suministrados por el fabricante. Se empleará la observación y cuestionarios para conocer el proceso de generación de electricidad y de la cadena interna de suministro de carbón.

Para el cálculo del porcentaje de humedad en el carbón mineral, se tomará una población de 720 horas, es decir, 24 horas de producción durante un mes. Para calcular la muestra se utiliza la siguiente fórmula:

$$n = \frac{N \times Z^2 \times P \times Q}{((N - 1) \times D^2) + (Z^2 \times P \times Q)}$$

$$n = \frac{N \times Z^2 \times P \times (1 - P)}{((N - 1) \times D^2) + (Z^2 \times P \times (1 - P))}$$

Donde:

N = 720

Z = 1.96

P = 0.05

Q = 0.95  
D = 5%

Al aplicar la fórmula anterior nos da un de tamaño de muestra de 66.36:

$$n = \frac{(720 \times 1.96^2 \times 0.05 \times (1 - 0.05))}{((720 - 1) \times 0.05^2) + (1.96^2 \times 0.05 \times (1 - 0.05))}$$

Lo cual nos indica que se estarán realizando muestras de cálculo de humedad del carbón mineral cada 11 horas (720 / 66.36).

- Fase 3: de acuerdo con la información recabada, se realizará el análisis de los datos y se determinará las áreas de oportunidad a mejorar; además de calcular la eficiencia de planta, de las calderas y de los equipos involucrados en la cadena interna de suministro del carbón, también, se diseñará la metodología de análisis de los resultados de las eficiencias de los equipos y causas de ineficiencias, desperdicios, falla y defectos o del incumplimiento de variables e indicadores. Se realizará un análisis estadístico de las variables y se utilizarán herramientas de calidad y administración para encontrar las causas raíz de las desviaciones.
- Fase 4: diseñar y evaluar propuestas de mejora de la productividad de la cadena interna de suministro del carbón mineral y equipos involucrados.
- Fase 5: discutir y redactar los resultados finales del estudio, presentar conclusiones y recomendaciones, y elaborar el informe final de la investigación.

Los resultados esperados con la propuesta de mejora en el almacenamiento, manejo y manipulación del carbón mineral en la cadena interna de suministro son:

- Reducción de la humedad en el carbón mineral.
- Aumento en la eficiencia de equipos y de generación de la planta.
- Aumento en la rentabilidad de la empresa.

## 10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

En el desarrollo de la presente investigación, se utilizarán técnicas de la estadística descriptiva, determinación de indicadores estadísticos para el análisis de la información como la media, mediana y desviación estándar.

Para la recopilación de información, se utilizará la observación directa del proceso de la cadena interna de suministro del carbón y se emplearán entrevistas o cuestionarios dirigidos al personal operativo y a gerentes. La recolección de datos de la eficiencia de planta se hará por medio de la bitácora de operaciones y de la información de humedad del carbón, se compilará por medio del reporte de laboratorio.

Se emplearán gráficos de control para representar el comportamiento de las diferentes variables relacionadas con el cálculo de la eficiencia de equipos y de generación.

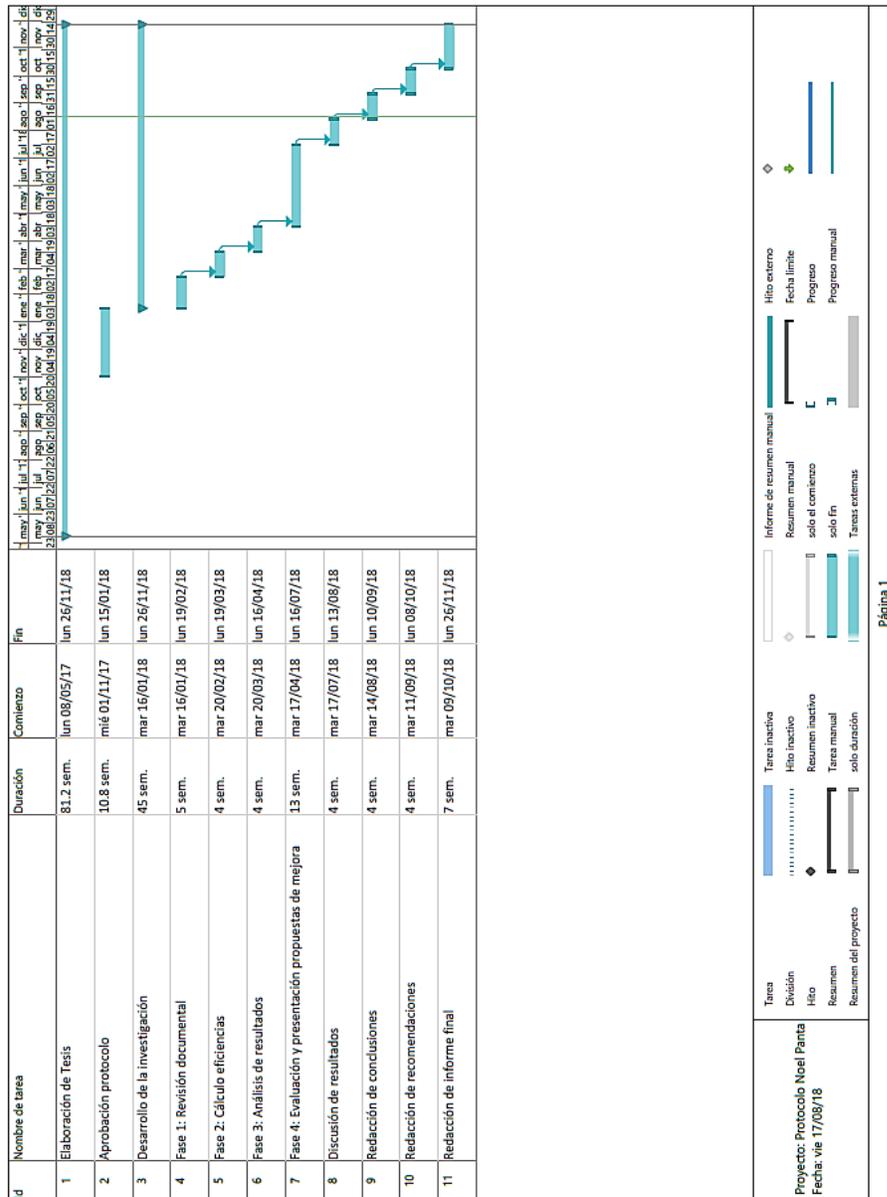
Las herramientas que se utilizarán para el análisis e interpretación de la información y que permitan identificar las causas de las desviaciones de la eficiencia de equipos son las siguientes:

- Histograma
- Diagrama de Pareto
- Diagrama causa-raíz ISHIKAWA
- Eficiencia global de equipos



# 11. CRONOGRAMA

Figura 18. Cronograma de actividades



Fuente: elaboración propia.



## 12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

El trabajo de investigación es factible, debido a que se cuenta con los recursos necesarios para llevar a cabo la presente investigación y cumplir con los objetivos trazados. La empresa proporcionará los siguientes recursos:

- Equipo de cómputo.
- Mobiliario y equipo de oficina.
- Internet.
- Recurso humano para la ejecución de tareas.
- Información histórica sobre la generación de la empresa.

El financiamiento de los gastos de materiales (papelería y útiles) y tecnología (internet) en los que se incurra durante la investigación serán aportados por la empresa, y los gastos de capital humano (tiempo y asesor), serán proporcionados por el investigador.

A continuación, se presenta el cuadro con los gastos o inversión a realizar para el desarrollo de la investigación.

Tabla VI. **Cuadro de gastos e inversión**

<b>No.</b>	<b>Recurso</b>	<b>Descripción</b>	<b>Inversión</b>	<b>%</b>
1	Capital humano	Tiempo de investigador	Q27,000.00	86.82%
2	Capital humano	Asesor	Q2,500.00	8.04%
3	Materiales	Papelería y útiles	Q1,000.00	3.22%
4	Tecnológico	Internet	Q600.00	1.93%
<b>Total</b>			<b>Q31,100.00</b>	<b>100.00%</b>

Fuente: elaboración propia.

### 13. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

1. ALARCÓN, A. H. *Implementación de OEE y SMED como herramienta de Lean Manufacturing en una empresa del sector plástico*. Ecuador: Universidad de Guayaquil, 2014. 182 p.
2. BAIN, D. *Productividad. La solución a los problemas de la empresa*. México: McGraw Hill, 2007. 182 p.
3. BERNAL, C. A. *Metodología de la investigación*. Colombia: Pearson Educación. 2010. 97 p.
4. BHATT, M. S. & RAJKUMAR, N. *Effect of moisture in coal on station heat rate and fuel cost for Indian thermal power plants*. Estados Unidos: Mcgraw-Hill, 2015. 786 p.
5. BHATTACHARYA, C.; BANERJEE, N.; SARKAR, H. S. *Economics of removal of coal moisture in thermal power generation with waste heat recovery. international journal of emerging technology and advance engineering*. Estados Unidos: Special Issue, 2013. 60 p.
6. BURGHALL, R.; GRANT, V.; MORGAN, J. *Lean Six Sigma business transformation for dummies*. Estados Unidos: John Wiley & Sons, 2010. 328 p.

7. CARTA, J. A.; CALERO, R.; COLMENAR, A.; CASTRO, M. A. *Centrales de energías renovables: generación eléctrica con energías renovables*. España: Pearson Educación, S.A. 2009. 382 p.
8. CERÓN, R. A. *Disponibilidad, confiabilidad y productividad de unidades generadoras*. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Mecánica Eléctrica. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala. 2007. 322 p.
9. EVANS, J. R.; Lindsay, W. R. *Administración y control de la calidad*. México: Cengage Learning, 2009. 183 p.
10. FELIZZOLA, H. & Luna, C. *Lean Six Sigma en pequeñas y medianas empresas: un enfoque metodológico*. Chile: Arica, 2014. 97 p.
11. GAFFERT, G.A. *Centrales de vapor*. México: Editorial Reverté S.A., 1998. 129 p.
12. GUTIÉRREZ, H. P. *Calidad total y productividad*. México: McGraw Hill, 2010. 173 p.
13. GUTIÉRREZ, H. P.; De la Vara, R. *Control estadístico de calidad y seis sigma*. México: McGraw Hill, 2009. 183 p.
14. GYGI, C., DECARLO, N.; Williams, B. *Six Sigma for dummies*. Estados Unidos: Willey Publishing, Inc., 2005. 97 p.
15. HERNÁNDEZ, R. *Metodología de la investigación*. México: McGraw Hill, 2014. 238 p.

16. Instituto Nacional de Electrificación (INDE). *Historia*. Guatemala: INDE, 2007. 239 p.
17. Instituto para la diversificación y ahorro de la energía (IDAE). *Energía de la biomasa*. España: IDAE, 2007. 201 p.
18. JUÁREZ, J. D. *Centrales hidroeléctricas*. México: Universidad Autónoma Metropolitana, 1992. 392 p.
19. KUMAR, S. D. *Prevention and control module for spontaneous combustion of coal at coal yards*. Estados Unidos: Mcgraw-Hill, 2010. 219 p.
20. Lean Solutions. *Lean manufacturing*. [En línea]. <<http://www.leansolutions.co/conceptos/lean-manufacturing/>>. [Consulta: 7 de marzo de 2017].
21. LIMÓN, J. D. Efectos de *Implementación de la manufactura esbelta en una línea de ensamble de la industria automotriz*. México: Universidad Autónoma de San Luis Potosí, 2015. 201 p.
22. LIKER, J. K. & MEIER, D. *The toyota way fieldbook. A Practical Guide for Implementing Toyota's 4Ps*. Estados Unidos: McGraw Hill, 2006. 391 p.
23. MORGAN, J. & BRENIG-JONES, M. *Lean Six Sigma for dummies*. Estados Unidos: John Wiley & Sons, Ltd., 2012. 392 p.

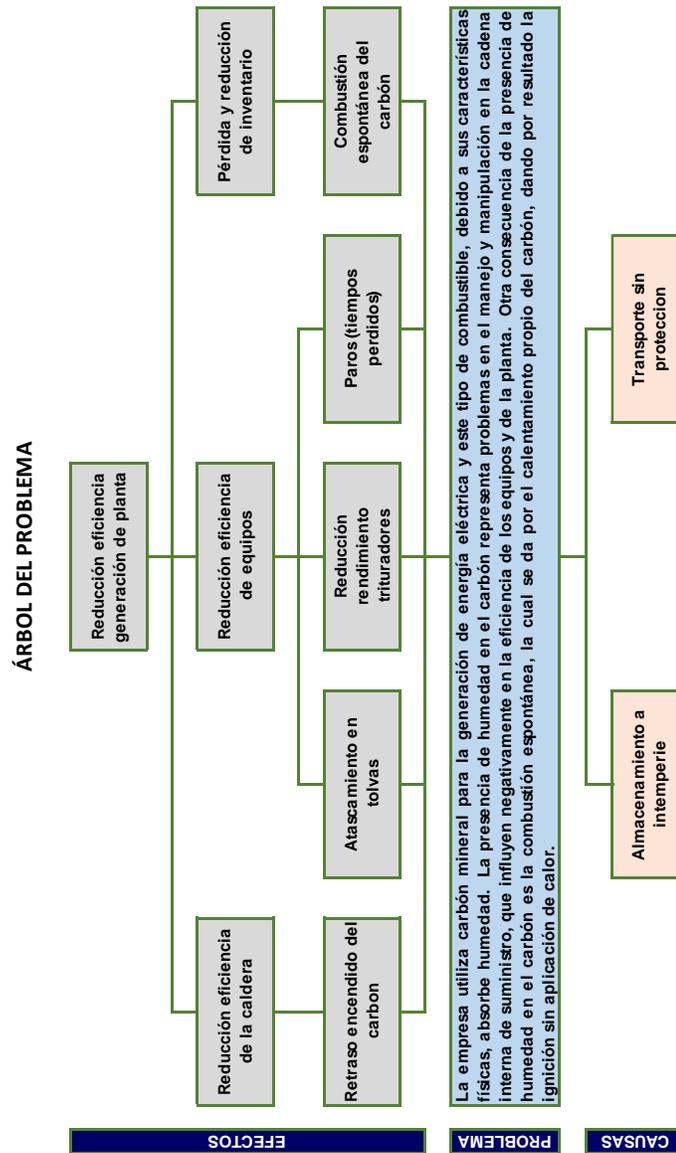
24. MEM. *Revista mensual de estadísticas del Ministerio de Energía y Minas*. México: Mem, 2017. 32 p.
25. MUJAL, M. R. *Tecnología eléctrica*. España: Edicions UPC, 2003. 49 p.
26. Oficina Internacional del Trabajo. *Introducción al estudio del trabajo*. Suiza: OIT, 1996. 184 p.
27. RODRÍGUEZ, S.; GONZÁLEZ, S.; ROJAS, G.; PALACIOS, P. *Energía y ambiente*. Colombia: Universidad Nacional, Sede Palmirak, 2013. 483 p.
28. RUEDA, L. C. Aplicación de la metodología Seis Sigma y lean manufacturing para la reducción de costos, en la producción de jeringas hipodérmicas desechables. México: Instituto Politécnico Nacional, 2010. 238 p.
29. SEVERNS, W. H.; DEGLER, H. E.; MILES, J. C. *La producción de energía mediante el vapor de agua, el aire y los gases*. España: Editorial Reverté, S.A., 1996. 194 p.
30. SUDHAKAR T.; PRASAD, B. A.; PRAHLADARAO, K. *Implementation of Six Sigma for Improved performance in power plants*. Estados Unidos: IOSR, 2012. 201 p.
31. SUMMERS, D. C. S. *Administración de la calidad*. México: Pearson Educación, 2008. 97 p.

32. VELOZ, J. *Recuperación de carbón para uso térmico para la generación de electricidad en las plantas carbo eléctricas de la Comisión Federal de Electricidad a partir de las pilas de desperdicio en Carbonífera de San Patricio, S.A. de C.V.* México: Universidad Autónoma de Nuevo León, 1998. 203 p.
33. UCIENCIA. *Colección científico técnica. Mineralogía. Galería.* España: Universidad de Málaga. 2015. 96 p.
34. UNESA. *Sector eléctrico: funcionamiento de las centrales eléctricas.* Colombia: Central de ciclo combinado, 2010. 210 p.
35. Urbasos, Á. *Optimización y gestión del riesgo del aprovisionamiento de carbón de centrales termoeléctricas.* España: Universidad Pontificia Comillas, 2007. 292 p.
36. Unidad de Planeación Minero Energética. *La cadena del carbón.* Colombia: Ministerio de Minas y Energía, 2006. 185 p.



# 14. APÉNDICES

## Apéndice 1. Árbol del problema



Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 2. Matriz de coherencia

MATRIZ DE COHERENCIA					
TÍTULO	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	VARIABLES	INDICADORES	TÉCNICAS INSTRUMENTOS	DESEÑO DE LA INVESTIGACIÓN
Diseño de investigación aplicación de lean sigma en el almacenamiento, manejo y manipulación del carbón mineral en la cadena interna de suministro para la reducción de humedad y aumento de eficiencia de una planta de generación eléctrica	Pérdida de eficiencia debido a presencia de humedad en carbón mineral en una planta de generación eléctrica.	Humedad carbón Flujo vapor Presión vapor Temperatura vapor Paros (tiempo perdido de operación)	Disponibilidad de planta Disponibilidad de caldera OEE Heat rate		Alcance: descriptivo  Enfoque: mixto (cuantitativo, cualitativo)  Diseño: no experimental  Tipo de estudio: descriptivo
<b>PREGUNTA PRINCIPAL:</b>	<b>OBJETIVO GENERAL:</b>	<b>VARIABLES</b>	<b>INDICADORES</b>	<b>TÉCNICAS INSTRUMENTOS</b>	
¿Cuál es la estrategia que se debe de implementar en una planta generadora de electricidad para la reducción de humedad en el carbón mineral?	Desarrollar una estrategia utilizando la metodología lean sigma para minimizar la presencia de humedad en el carbón mineral.	Humedad carbón Flujo vapor Presión vapor Temperatura vapor Paros (tiempo perdido de operación)	Disponibilidad de planta Disponibilidad de caldera OEE Heat rate		
<b>PREGUNTAS AUXILIARES:</b>	<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS:</b>	<b>VARIABLES</b>	<b>INDICADORES</b>	<b>TÉCNICAS INSTRUMENTOS</b>	
1. ¿Cuál es la eficiencia de generación de electricidad de la empresa?	1. Determinar la eficiencia de la planta en la generación de energía eléctrica previo a la propuesta que se presenta en este trabajo.	Capacidad teórica de generación de la planta	Fiabilidad y validez de datos recopilados	Revisión documental Manuales fabricantes de equipos Planos de equipos	
2. ¿Qué procesos se deben de mejorar para reducir la humedad en carbón mineral e incrementar la eficiencia de la generación?	2. Evaluar los procesos y determinar cuáles deben de ser mejorados para reducir la humedad en el carbón mineral.		Resultados de cálculo de la eficiencia de los equipos	Registro control variables Registro control indicadores Entrevistas Observación	
3. ¿Cuál es la metodología adecuada para la medición y análisis de la eficiencia de equipos?	3. Definir la metodología adecuada para el análisis de resultados de eficiencia de equipos, causas de ineficiencias, desperdicios o del incumplimiento de variables e indicadores.		Eficacia del análisis de resultados	Análisis estadístico Diagrama de Pareto Histograma Diagrama cause-raíz ISHIKAWA	
4. ¿Cómo incidirá la implementación de buenas prácticas de almacenamiento y manejo de pilas de carbón en la reducción de humedad y en el incremento de la eficiencia de la generación eléctrica?	4. Evaluar o determinar en qué forma incidirá en la eficiencia de la generación eléctrica la implementación de buenas prácticas de almacenamiento y manejo de las pilas de carbón.		Informe de propuestas de mejora de productividad	Análisis de mejoras	

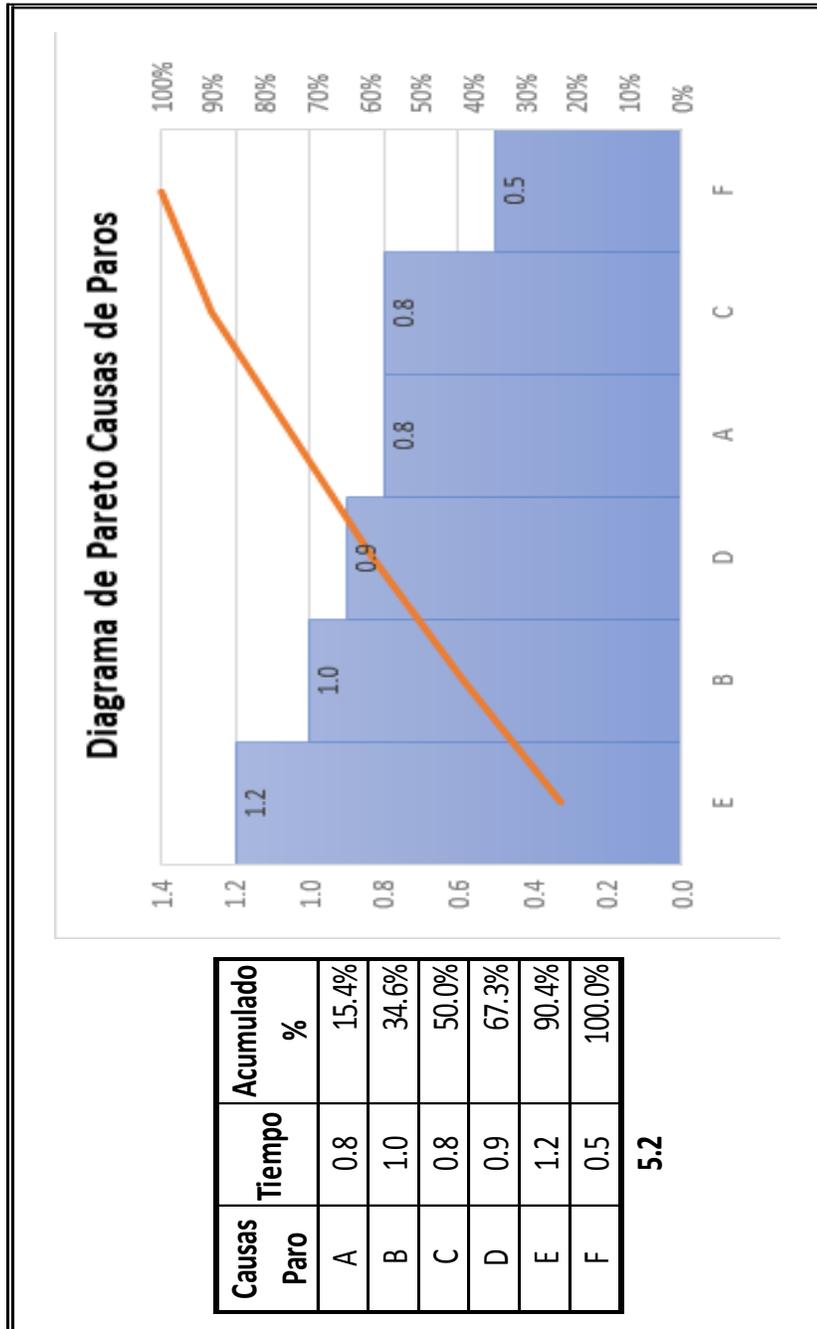
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. Cuestionario de diagnóstico

CUESTIONARIO DE DIAGNÓSTICO	
<b>Dirigido a:</b>	_____
<b>Nombre:</b>	_____
1. ¿Qué factores considera usted que afectan la eficiencia de los equipos?	_____ _____
2. ¿Cuál de estos factores considera usted que tiene mayor impacto en la eficiencia?	_____ _____
3. ¿Con qué frecuencia hay paros de equipos debido a las condiciones del carbón?	_____ _____
4. ¿Cuál es el procedimiento para retirar el carbón húmedo de los equipos?	_____ _____
5. ¿Qué método utilizan para el almacenamiento del carbón mineral?	_____ _____
6. ¿Cuál es el procedimiento de despacho o suministro de carbón mineral?	_____ _____
7. ¿Qué método se utiliza para calcular el porcentaje de humedad en el carbón mineral?	_____ _____
8. ¿Con qué frecuencia realizan muestreo de carbón para el cálculo de humedad?	_____ _____
9. ¿Qué acciones o medidas se han tomado para reducir la humedad en el carbón mineral?	_____ _____ _____

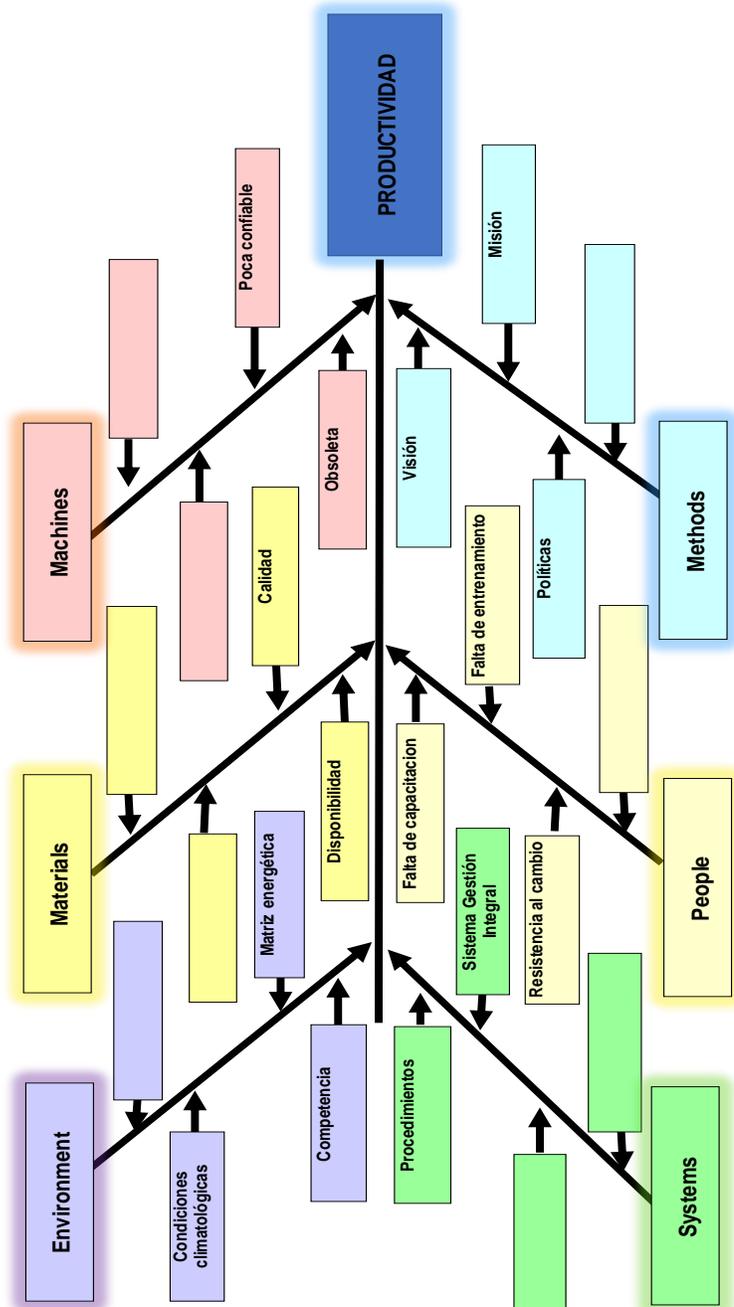
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Diagrama de Pareto**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. Diagrama causa-raíz (Ishikawa)



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. **Formato registro humedad carbón mineral**

**Registro y cálculo humedad carbón mineral**

Muestreo no.: \_\_\_\_\_  
Fecha: \_\_\_\_\_  
Hora: \_\_\_\_\_

Peso inicial	Peso final	% humedad	Observaciones

**Fotografía condición carbón**

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. **Formato ficha observación directa**

<b>FICHA OBSERVACION DIRECTA</b>		
<b>Proceso investigacion:</b> _____ <b>Fecha:</b> _____ <b>Hora:</b> _____		
	<b>SI</b>	<b>NO</b>
1. ¿El personal utiliza el equipo proteccion personal?		
2. ¿Se cuenta con procedimientos para la ejecución de actividades?		
3. ¿El personal cumple con los procedimientos establecidos?		
4. ¿Están disponibles los procedimientos para el personal operativo?		
5. ¿El personal operativo entienden los procedimientos?		
6. ¿El lugar de trabajo se mantiene en condiciones óptimas de orden y limpieza?		
<b>Observaciones:</b>		
_____		
_____		
_____		
_____		
_____		
_____		
_____		
_____		
_____		

Fuente: elaboración propia.

