



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Gestión Industrial

**MEJORAR LA PRODUCTIVIDAD DE UN INGENIO AZUCARERO MEDIANTE LA
EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE INSTALAR UN TURBOGENERADOR
EXTRACCIÓN-CONDENSACIÓN**

Ing. Luis René Vidal Zenteno

Asesorado por MSc. Ing. Renaldo Girón Alvarado

Guatemala, julio de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**MEJORAR LA PRODUCTIVIDAD DE UN INGENIO AZUCARERO MEDIANTE LA
EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE INSTALAR UN TURBOGENERADOR
EXTRACCIÓN-CONDENSACIÓN**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ING. LUIS RENÉ VIDAL ZENTENO

ASESORADO POR MSC. ING. RENALDO GIRON ALVARADO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN ARTES EN GESTION INDUSTRIAL

GUATEMALA, JULIO DE 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
DIRECTOR	Ing. Edgar Darío Alvarez Cotí
EXAMINADOR	Ing. Kenneth Lubeck Corado Esquivel
EXAMINADOR	Dr. Flavio Welmer Reyes Rodas
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

**MEJORAR LA PRODUCTIVIDAD DE UN INGENIO AZUCARERO MEDIANTE LA
EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE INSTALAR UN TURBOGENERADOR
EXTRACCIÓN-CONDENSACIÓN**

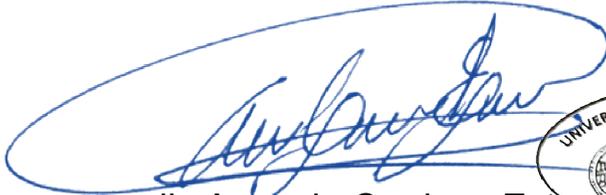
Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado con fecha 19 de febrero de 2019.

Ing. Luis René Vidal Zenteno

LNG.DECANATO.OI.531.2022

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Posgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **MEJORAR LA PRODUCTIVIDAD DE UN INGENIO AZUCARERO MEDIANTE LA EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE INSTALAR UN TURBOGENERADOR EXTRACCIÓN-CONDENSACIÓN**, presentado por: **Luis René Vidal Zenteno**, que pertenece al programa de Maestría en artes en Gestión industrial después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Decana

Guatemala, julio de 2022

AACE/gaoc



Guatemala, julio de 2022

LNG.EEP.OI.531.2022

En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del asesor, verificar la aprobación del Coordinador de Maestría y la aprobación del Área de Lingüística al trabajo de graduación titulado:

“MEJORAR LA PRODUCTIVIDAD DE UN INGENIO AZUCARERO MEDIANTE LA EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE INSTALAR UN TURBOGENERADOR EXTRACCIÓN-CONDENSACIÓN”

presentado por **Luis René Vidal Zenteno** correspondiente al programa de **Maestría en artes en Gestión industrial** ; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”

Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Colí
Director

Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería





Guatemala 20 de abril 2022.

M.A. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Presente

M.A. Ingeniero Álvarez Cotí:

Por este medio informo que he revisado y aprobado el **INFORME FINAL** titulado: **“DISEÑO DE UNA PROPUESTA PARA MEJORAR LA PRODUCTIVIDAD DE UNA PLANTA TÉRMICA DE UN INGENIO AZUCARERO MEDIANTE LA EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICO DE INSTALAR UN TURBOGENERADOR CON TECNOLOGÍA EXTRACCIÓN-CONDENSACIÓN”** del estudiante **Luis René Vidal Zenteno** quien se identifica con número de carné **201123088** del programa de **Maestría en Gestión Industrial**.

Con base en la evaluación realizada hago constar que he evaluado la calidad, validez, pertinencia y coherencia de los resultados obtenidos en el trabajo presentado y según lo establecido en el *Normativo de Tesis y Trabajos de Graduación aprobado por Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería Punto Sexto inciso 6.10 del Acta 04-2014 de sesión celebrada el 04 de febrero de 2014*. Por lo cual el trabajo evaluado cuenta con mi aprobación.

Agradeciendo su atención y deseándole éxitos en sus actividades profesionales me suscribo.

Atentamente,

MA. Ing. Kenneth Lubeck Corado Esquivel
Coordinador
Maestría en Gestión Industrial
Escuela de Estudios de Postgrado

Guatemala, Febrero de 2022

En mi calidad como Asesor del Ingeniero **Luis Rene Vidal Zenteno** quien se identifica con carné 201123088 procedo a dar el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: **“DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA MEJORAR LA PRODUCTIVIDAD DE UN INGENIO AZUCARERO MEDIANTE LA EVALUACION TECNICO-ECONOMICA DE INSTALAR UN TURBOGENERADOR EXTRACCION-CONDENSACION”** quien se encuentra en el programa de Maestría en Artes en Gestión Industrial en la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”



Renaldo Girón Alvarado
Ingeniero Industrial
Colegiado No. 5977

Mtro. Ing. Renaldo Girón Alvarado
Asesor

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por brindarme una segunda oportunidad de vida y ser una importante influencia en el transcurso de mi vida universitaria.
Mis padres	Por su amor, comprensión, apoyo incondicional en el cumplimiento de esta meta.
Mis hermanos	Ricardo, Francisco, Amandy y Hector Vidal, por su cariño y apoyo.
Mi esposa	Marianela Flores, por su amor, apoyo y motivación en el transcurso de esta etapa profesional.
Mis hijos	Marcos y Paula Vidal, por ser la motivación principal para lograr este objetivo.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser la casa de estudios que me brindó el conocimiento para ser un profesional.
Facultad de Ingeniería	Por la enseñanza transmitida a lo largo de mi carrera.
Mis amigos	Por su apoyo y consejos en el transcurso de toda mi vida universitaria.
Mi asesor	MSc. Ing. Renaldo Girón, por su amistad, enseñanza y apoyo incondicional.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS.....	VII
GLOSARIO.....	IX
RESUMEN.....	XI
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XIII
OBJETIVOS	XVII
METODOLOGÍA.....	XIX
INTRODUCCIÓN.....	XXIII
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Plantas cogeneradoras en la industria azucarera	1
1.2. Eficiencia de las plantas cogeneradoras.....	1
1.2.1. Factores que influyen en la eficiencia de centrales térmicas	2
1.2.2. Consumo específico	2
1.2.3. Combustión.....	2
1.3. Aspectos que influye en la productividad en una planta cogeneradora	3
1.3.1. Costos de operación	3
1.3.2. Equipos de alta eficiencia	3
1.4. Tecnologías de turbinas para plantas cogeneradoras.....	3
1.5. Turbinas de vapor.....	4
1.5.1. Turbinas de contrapresión	4
1.5.2. Turbinas de condensación	4
1.5.3. Turbinas combinadas (extracción - condensación) ...	5

1.6.	Criterios de evaluación	5
1.6.1.	Valor actual neto (VAN)	5
1.6.2.	Tasa interna de retorno.	6
1.6.3.	Periodo de recuperación de la inversión (PRI).....	7
2.	SITUACIÓN ACTUAL DEL ÁREA DE GENERACIÓN	9
2.1.	Operación actual	9
2.1.1.	Área de producción de vapor.....	11
2.1.2.	Área de producción de energía.....	11
2.2.	Planteamiento del problema.....	11
2.3.	Alcance de la propuesta	12
3.	ANÁLISIS TÉCNICO DE LOS EQUIPOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA.	13
3.1.	Calderas.....	13
3.1.1.	Calderas de baja presión.....	13
3.1.2.	Calderas de alta presión.....	14
3.2.	Turbogeneradores.....	15
3.2.1.	Turbogeneradores de condensación	15
3.2.2.	Turbogeneradores de extracción	15
3.2.3.	Turbogeneradores combinados (extracción- condensación)	16
3.2.4.	Turbogeneradores instalados	16
3.2.4.1.	Turbogenerador #4 GE 26MW.....	16
3.2.4.2.	Turbogenerador #7 SNM-BRUSH 22MW	17
3.2.4.3.	Turbogenerador #6 TGM 20MW	18
3.2.4.4.	Turbogenerador Westinghouse #5 10MW	19

3.2.4.5.	Turbogenerador #3 GE 7.5MW	20
3.2.5.	Capacidad instalada de generación de energía	21
3.2.6.	Eficiencias de turbogeneradores	22
3.3.	Producción de energía térmica	22
3.4.	Producción de energía eléctrica.....	23
3.4.1.	Generación de energía bruta	23
3.4.2.	Consumo interno industrial	23
3.4.3.	Venta de energía al SNI.....	23
3.5.	Modelo de operación propuesto.....	23
4.	RESULTADOS.....	27
4.1.	Especificaciones y requerimientos para adquirir equipos modernos de generación de energía.	27
4.2.	Factores clave de éxito que ayuden a mejorar el esquema de operación.....	29
4.2.1.	Sostenibilidad empresarial	29
4.2.2.	Medio ambiente	30
4.2.3.	Excelencia operacional	30
4.2.4.	Innovación y tecnología	30
4.3.	Normativa para que exista un procedimiento de operación.....	30
4.4.	Productividad de la empresa	31
4.5.	Análisis financiero.....	32
5.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	35
	CONCLUSIONES.....	37
	RECOMENDACIONES.....	39
	REFERENCIAS	41
	APÉNDICES.....	43

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Esquema de operación actual	10
2.	Turbogenerador GE 26 mw	17
3.	Turbogenerador SNM 22MW.....	18
4.	Turbogenerador TGM 20mw	19
5.	Turbogenerador Westinghouse 10 mw.....	20
6.	Turbogenerador GE 7.5 mw	21
7.	Esquema de operación propuesto con turbogenerador extracción-condensación.....	25

TABLAS

I.	Tabla de variables en análisis	XXI
II.	Calderas de baja presión.....	14
III.	Calderas de alta presión.....	14
IV.	Consumo específico turbogeneradores	22
V.	Especificaciones de turbinas	27
VI.	Especificaciones generadores.....	28
VII.	Precios de oferentes turbogeneradores.....	28
VIII.	Costos de inversión total	29
IX.	Flujo de efectivo de inversión	33

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
CE	Consumo específico
kg/kW	Consumo específico de turbogenerador
\$	Dólar estadounidense
kWh	Energía expresada en kilovatio hora
h	Horas
kW	Kilovatio
KV	Kilovoltio
lb/kW	Libras de vapor sobre kilovatio
>	Mayor que
MW	Megavatio
MWh	Megavatio hora
%	Porcentaje
P	Potencia
PSI	Presión
Q	Quetzales
RPM	Revoluciones por minuto
Tm	Toneladas métricas
Tm/kW	Toneladas métricas de vapor sobre kilovatio
TPH	Tonelada por hora

GLOSARIO

AMM	Administrador del Mercado Mayorista.
Casa de máquinas	Infraestructura en donde se encuentra la o las turbinas de una central térmica.
Energía cinética	Energía debida a un movimiento determinado.
Energía potencial	Energía que contiene el agua debido a la altura y es aprovechable para generar electricidad a partir de la misma.
SNI	Sistema Nacional Interconectado.
Spot	Costo del MWh en Guatemala al más bajo precio.
Turbina condensación	Maquina rotativa que agota la energía cinética del vapor por debajo de la presión atmosférica hasta convertir el vapor en agua.
Turbina extracción	Maquina rotativa que agota la energía cinética del vapor hasta una presión deseada.
Turbogenerador	Conjunto acoplado de una turbina y un generador eléctrico.

RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo diseñar una propuesta para mejorar la productividad de una planta térmica de un ingenio azucarero mediante la instalación de un turbogenerador con tecnología extracción – condensación.

La investigación tiene un enfoque cuantitativo con un alcance descriptivo realizado en el área de generación de energía y pretende analizar un mejor aprovechamiento del vapor en las unidades generadoras.

Los resultados más relevantes en el diseño de la propuesta es la adquisición de un turbogenerador con eficiencia de 5.25 kg/kW para producir un flujo de energía de 46,000 kWh, lo que representa una inversión total de \$10,010,745 con indicadores financieros de tasa interna de retorno del 18 % y periodo de recuperación de tres años.

Se concluye que para mejorar la productividad de la empresa se debe adquirir la unidad turbogeneradora extracción-condensación mencionada en el párrafo anterior pues dispone de versatilidad en la operación y tiene consumo específico por debajo de todas las unidades generadoras con las que cuenta la empresa en estudio.

Se recomienda realizar la inversión debido a que los indicadores financieros proyectan valores positivos y viables que inciden en la rentabilidad y sostenibilidad de la empresa.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

- Contexto general

Con el pasar de los años se ha observado que existe baja productividad en la operación de una planta generadora de un ingenio azucarero en el municipio de Santa Lucía Cotzumalguapa, esto quiere decir que no se aprovecha al máximo la energía térmica que es convertida en energía eléctrica, así mismo un costo de operación encarecido.

- Descripción del problema

Actualmente el sistema energético del ingenio en estudio ubicado en el municipio de Santa Lucía Cotzumalguapa tiene baja productividad en el proceso de generación de energía eléctrica, debido a que cuenta con turbogeneradores que carece de tecnología de punta.

El contar con equipo antiguo o dicho de otro modo clasificado como obsoletos, hace tener personal operativo controlando cada unidad productiva, así también no se cuenta con los procedimientos de operación actualizados o en su defecto no existen, esto conlleva a que se requiera de un alto número de personal operativo debido a que todos los mecanismos son manuales.

Las causas mencionadas con anterioridad provocan problemas los cuales son: desaprovechamiento de la energía térmica y mala operación, esto trae como consecuencia altas pérdidas de energía, baja productividad de la planta y por consecuente alto costo de generación de energía eléctrica.

- Formulación del problema

Para el presente diseño de investigación se formularon las siguientes preguntas de investigación

- Pregunta central

¿Es factible desarrollar una propuesta técnica para mejorar la productividad de una planta generadora mediante la adquisición de un turbogenerador extracción-condensación en un ingenio azucarero?

- Preguntas auxiliares

- ¿Cuáles son las especificaciones y requerimientos que se deben de proponer para adquirir equipos de generación de energía modernos?
- ¿Cuáles son los factores clave de éxito que ayuden a mejorar el esquema de operación?
- ¿Qué normativa se puede analizar para que exista un procedimiento de operación?

- Delimitación del problema

La investigación mencionada a lo largo de este informe se realizará en una empresa agroindustrial, la cual sus principales actividades económicas son: la producción de edulcorantes y la generación de energía eléctrica. El desarrollo de la investigación se realizará en el área de generación de energía la cual es una

de las grandes áreas de producción de la industria en estudio. Dicha empresa se encuentra ubicada en el municipio de Santa Lucía Cotzumalguapa del departamento de Escuintla. La investigación se realizará en los meses de enero a diciembre de 2021.

OBJETIVOS

General

Diseñar una propuesta para mejorar la productividad de una planta térmica de un ingenio azucarero mediante la instalación de un turbogenerador con tecnología extracción – condensación

Específicos

- Proponer especificaciones y requerimientos para adquirir equipos de generación de energía modernos
- Identificar los indicadores clave de éxito que ayuden a mejorar el esquema de operación.
- Analizar una normativa para actualizar los procedimientos de operación.

METODOLOGÍA

Se define la metodología como un conjunto de técnicas y procedimientos que se aplican de forma ordenada para realizar un estudio. A continuación, se muestra la metodología de la investigación que refiere la forma en que se plateo la presente investigación

- Características del estudio

El enfoque del estudio propuesto es cuantitativo. Es cuantitativo porque se realizará análisis de datos, y valores numéricos. Se analizarán datos de consumo de vapor, eficiencia de las máquinas, costos; debido a las variables en estudio es cuantitativo.

El alcance adoptado es descriptivo. “La investigación descriptiva busca especificar propiedades, características y rasgos importantes de cualquier fenómeno que se analice” (Hernández, Fernández y Baptista, 2014, p. 80). Se buscará dar una opción de rentabilidad del problema planteado.

Se adoptará un diseño no experimental, Hernández, *et al.*, (2014) refiere que la investigación no experimental, son: “Estudios que se realizan sin la manipulación deliberada de variables y en los que solo se observan los fenómenos en su ambiente natural para analizarlos” (p. 152).

La información del diseño de una propuesta para mejorar la eficiencia y productividad de una planta térmica de un ingenio azucarero mediante la evaluación técnico-económica de instalar un turbogenerador con tecnología

extracción-condensación, se analizará con datos naturales obtenidos de históricos, datos extraídos de las hojas técnicas de los equipos, por lo que no se hará manipulación de los datos. Adicional, será transaccional ya que solo se recolectarán los datos mencionados una sola vez.

- Unidades de análisis

Se tomará en cuenta como población en estudio los turbogeneradores. Debido a que esta población es pequeña no es necesario utilizar fórmulas para calcular el tamaño de muestra. El muestro que se utilizará será el de selección intencional, ya que se seleccionará los equipos que actualmente intervienen en la operación

- Variables

Las variables que se utilizarán en el desarrollo son del tipo dependientes e independientes. Para las variables cuantitativas se analizarán de tipo continuas y para las variables cualitativas en escala ordinal. A continuación, se describen las variables en análisis.

Tabla I. **Tabla de variables en análisis**

Variable	Tipo	Definición teórica	Definición operativa
Eficiencia en turbogeneradores	Dependiente	Capacidad para realizar o cumplir adecuadamente una función	Medición cuantitativa de tipo continua.
Alto número de personal con costos altos de operación	Dependiente	Conjunto de personas que se desempeñan y prestan sus servicios profesionales en alguna empresa	Medición cuantitativa de tipo discreta.
Procedimientos de operación	Dependiente	Acciones que tienen que realizarse todas igualmente, para obtener los mismos resultados bajo las mismas circunstancias	Medición cualitativa en escala ordinal.
Costo de la generación de energía	Independiente	Cantidad de dinero que cuesta generar energía eléctrica en una planta de generación.	Medición cuantitativa de tipo continua, en dólares americanos (\$).
Pérdidas de energía	Independiente	Es la cantidad de energía que se desaprovecha en un sistema.	Medición cuantitativa de tipo continúa.
Productividad de la planta de generación	Independiente	Capacidad de producir por unidad de trabajo.	Medición cuantitativa de tipo continúa.

Fuente: elaboración propia.

- **Fases del estudio**

Dentro de este estudio se utilizaron varias técnicas, las cuales fueron cuantitativas como cualitativas. Para las técnicas cuantitativas se utilizó, recolección de datos, evaluación de costos, lo cual sirvió para evaluar alternativas.

- Evaluación de la situación actual de la operación y recolección de información

La recolección de datos sirvió para tener una base para realizar una comparativa de datos con turbogeneradores modernos. Se analizó la situación actual de operación del ingenio en estudio, lo cual llevó recolectar datos de consumo de vapor de las turbinas, generación de energía de cada unidad generadora con la que se opera; se analizaron alternativas de nuevos turbogeneradores.

- Análisis de información

Se compararon las unidades instaladas contra unidades modernas. Con la información recolectada se realizó una comparativa entre la operación actual y una operación con una nueva proyección de generación de energía con la mejor alternativa de turbogeneradores modernos.

- Análisis de económico

Se realizó una proyección de costo beneficio de adquirir un turbogenerador moderno. La adquisición de un turbogenerador moderno da la oportunidad de cambiar el modo de operación para lo cual es importante describir la manera en la cual se va a recuperar la inversión. Se analizó el valor de la puesta marcha del proyecto versus la energía extra producida con los actuales equipos de producción de vapor con el turbogenerador propuesto, lo cual dará un indicador de la productividad esperada de la empresa.

INTRODUCCIÓN

El ingenio azucarero en estudio ubicado en el municipio de Santa Lucía Cotzumalguapa cuenta con tecnología que bien podría calificarse como obsoleta; siendo dicha obsolescencia acentuada por la baja eficiencia de estos equipos, siendo estos los equipos de generación de energía (turbogeneradores). Por lo anterior, actualmente se ha determinado de manera oficial la condición de ineficiencia en el área de generación de energía de la ya mencionada unidad productiva.

La automatización de procesos ha significado incrementos en la productividad y la disminución de costos gracias a la innovación tecnológica. Siguiendo esta línea, se realizó el estudio en la línea de investigación de Innovación, en específico ahondando en la relación Tecnología-Productividad.

Por ende, el presente documento tiene formulada una propuesta técnica para evaluar la viabilidad de la adquisición de un turbogenerador extracción-condensación y demostrar cómo el incremento de la productividad justifica la inversión.

El aumento de la productividad quedará formalmente respaldado gracias a la evaluación propuesta, así como se podrá tener una mayor claridad acerca de las especificaciones y requerimientos de los equipos modernos que existen. Los factores clave de éxito (FCE) determinaron la manera en la que se mejorará el esquema de operación.

El diseño de este estudio se considera factible, debido a que se hará comparativa de especificaciones de los equipos con los que cuenta la empresa y las nuevas tecnologías. Así mismo a lo largo del trabajo se encontrará una breve introducción a la cogeneración de energía en el sector agroindustrial; como también la elaboración de estudio técnico-económico y la propuesta para mejorar la productividad.

El trabajo de investigación se divide en cinco capítulos los cuales se dividen de la siguiente manera.

En el primer capítulo se describe el marco teórico. Los temas más relevantes contenidos en este espacio son plantas cogeneradoras en la industria azucarera eficiencia de las plantas cogeneradoras, crecimiento de la productividad empresarial, factores que influyen en la eficiencia y productividad de una planta cogeneradora y tecnologías para plantas cogeneradoras.

El segundo capítulo se presenta la situación actual de la empresa, la delimitación del problema como también el alcance de la propuesta.

El capítulo tres contiene el estudio técnico, en el cual se especifican los equipos de producción de vapor y equipos de generación de energía turbogeneradores, así mismo el estudio técnico de la operación actual.

El cuarto capítulo contiene los resultados de la investigación. Se plateo la propuesta de especificaciones y requerimientos para adquirir equipos de generación de energía modernos. Se identificaron los indicadores clave de éxito que ayuden a mejorar el esquema de operación. Se analizó una normativa para actualizar los procedimientos de operación. Y se realizó una evaluación financiera para identificar el retorno de la inversión

El quinto capítulo se presenta la discusión de resultados, es el momento de análisis, interpretación y reflexión de los hallazgos más importantes de la investigación.

1. MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se presenta la información y conceptos técnicos necesarios para comprender y analizar el contenido de la presente investigación.

1.1. Plantas cogeneradoras en la industria azucarera

Existen varias definiciones de cogeneración, Muñoz y Rovira (2014) señalan que:

La cogeneración es la producción conjunta de energía térmica y mecánica; energía térmica aprovechable en forma de gases o líquidos calientes y energía mecánica que se puede utilizar directamente para accionamiento mecánico pero que en la mayoría de los casos se convierte en energía eléctrica mediante un alternador. (p. 41)

Para este trabajo se definirá a la cogeneración como el proceso en el cual se obtiene energía eléctrica y energía térmica útil para otro proceso. Este proceso es utilizado en la mayoría de los ingenios azucareros en Guatemala.

1.2. Eficiencia de las plantas cogeneradoras

La eficiencia es parte fundamental para que las centrales de generación trabajen de forma óptima. La eficiencia es un dato numérico que da a conocer la capacidad de realizar un trabajo adecuadamente. Para este estudio se analizará la eficiencia de las turbinas de vapor, para lo cual dicha eficiencia es medida

como la relación entre el consumo de vapor de las turbinas y la energía total generada es decir kg/kW.

1.2.1. Factores que influyen en la eficiencia de centrales térmicas

El consumo específico de las turbinas y la combustión en calderas son los factores más influyentes en una central de cogeneración. Se sabe que cada máquina o equipo cuenta con su propia eficiencia con la que fue construida y diseñada, pero con el pasar de los años los diseños de las máquinas han ido mejorando. En este estudio se analizará y comparará las eficiencias de las unidades turbogeneradoras actuales con las que cuentan la empresa y las nuevas tecnologías que existen en el mercado.

1.2.2. Consumo específico

Es un dato de suma importancia dado por el fabricante de turbinas de vapor. Con este dato se puede saber cómo es el aprovechamiento de la energía cinética del vapor en un turbogenerador, para ser transformada en energía eléctrica su nomenclatura está dada por kg/kW.

1.2.3. Combustión

“La combustión es la receta de como quemar un combustible en una caldera. La combustión es el término técnico para la reacción química del oxígeno con los componentes de los combustibles, incluyendo la emisión de energía” (Muñoz, 2015, p. 11). La combustión en una caldera es fundamental para determinar su eficiencia.

1.3. Aspectos que influye en la productividad en una planta cogeneradora

La productividad es un parámetro fundamental para saber si se están haciendo bien las cosas dentro de una empresa. Es la relación entre la producción obtenida por un sistema de producción o servicios y los recursos para obtenerla. En términos generales la productividad es crear más bienes con menos recursos. A continuación, se presentan los aspectos más relevantes que afectan la productividad.

1.3.1. Costos de operación

Son aquellos que son inherentes para que se pueda producir un bien o servicio. Los costos de operación es un aspecto que influye directamente con la productividad. Reducir los costos de operación es una ventaja competitiva para dar rentabilidad a la empresa

1.3.2. Equipos de alta eficiencia

Contar con equipo con alta eficiencia influye en la productividad. Una alta eficiencia para una turbina de vapor es aquella que va a poder transferir su energía mecánica con un menor consumo de vapor. Se puede aumentar la productividad teniendo equipos con alta eficiencia es decir con turbinas de vapor con un consumo específico de 5.9 kg/ kW o menores.

1.4. Tecnologías de turbinas para plantas cogeneradoras

En el siguiente apartado se contextualizará las turbinas de vapor de mayor uso en la industria azucarera.

1.5. Turbinas de vapor

Las turbinas de vapor son las encargadas de transformar la energía cinética del vapor en energía mecánica. Velásquez (2007) menciona que una turbina de vapor es una turbomáquina que transforma la energía de un flujo de vapor de agua en energía mecánica. Para este estudio se hará referencia a tres tipos de turbinas las cuales son las más utilizadas en la industria azucarera en Guatemala, las cuales se mencionan a continuación.

1.5.1. Turbinas de contrapresión

Las turbinas de vapor de contrapresión también son llamadas turbinas de escape. Velásquez (2015) define que las turbinas de contrapresión “se utilizan para expandir, y de esta forma reducir la presión del vapor generando, y al mismo tiempo la energía mecánica y luego descargan el vapor a una presión aún elevada, para ser utilizado en procesos industriales” (p. 25). Por lo que queda claro que estas turbinas son utilizadas cuando existe un uso posterior del vapor en un proceso industrial.

1.5.2. Turbinas de condensación

Las turbinas de condensación son las más utilizadas en las centrales termoeléctricas. Suelen ser de mayor tamaño y se requieren de un condensador, regularmente la presión de descarga de dichas turbinas suele ser inferior a la presión atmosférica esto debido a la condensación del vapor. En la industria azucarera estas son de gran utilidad para la generación en no zafra.

1.5.3. Turbinas combinadas (extracción - condensación)

Turbinas que pueden trabajar de las dos formas. Estas turbinas son de gran utilidad debido a que se puede aprovechar cierta parte del vapor agotado en la turbina para un subproceso y el vapor restante se puede condensar para la recuperación de su agua. Se evaluará esta tecnología por su versatilidad para ser aprovechado el vapor.

1.6. Criterios de evaluación

Los criterios de evaluación son los instrumentos que ayudan a los inversionistas a saber si obtendrán una buena rentabilidad de la inversión a realizarse. Los indicadores más comunes son: valor actual neto (VAN), tasa de interés retorno (TIR), Periodo de recuperación de la inversión (PRI) y relación costo-beneficio. Para el desarrollo de la presenta investigación se hará el uso de los primeros tres antes mencionados.

1.6.1. Valor actual neto (VAN)

Menciona Chain (2011) el valor actual neto es el método más conocido, mejor y más generalmente aceptado por los evaluadores de proyectos. Si el resultado es mayor que cero mostrara que el proyecto es factible ya que está generando una ganancia con la tasa de interés impuesta por el inversor, si el resultado es cero nos indica que la inversión tiene exactamente la misma tasa que se quería obtener por lo que sigue siendo rentable la inversión, si el resultado es menor que cero nos indica que no se logra cumplir con la tasa impuesta por el inversor. La ecuación para el cálculo del VAN se muestra a continuación.

$$VAN = \sum_{T=1}^n \frac{Fn}{(1+i)^n} - Io \text{ (Ec. 1)}$$

Donde:

Io = Inversión Inicial

Fn = Flujos de caja

I = tasa de descuento

n = tiempo de recuperación del proyecto

1.6.2. Tasa interna de retorno

Afirma Chain (2011) que la TIR indica la máxima tasa exigible para el proyecto es decir aquella que el VAN sea cero. Su método de cálculo se muestra a continuación.

$$TIR = \sum_{T=1}^n \frac{Fn}{(1+i)^n} = 0 \quad \text{(Ec. 2)}$$

Donde:

Fn = Flujos de caja

I = Inversión inicial

n = número de periodos

1.6.3. Periodo de recuperación de la inversión (PRI)

Indicador financiero que tiene por objeto medir el tiempo en el cual se recupera la inversión tomando en cuenta el costo de capital, mas no toma en cuenta el valor del dinero en el tiempo. A continuación, se muestra su forma de cálculo.

$$PRI = A + \frac{B}{C} \quad (ec. 3)$$

Dónde:

A = Año anterior en que se recupera la inversión

B = flujo de efectivo acumulado del año anterior que se recupera la inversión

D = Flujo de efectivo del año en que se recupera la inversión

2. SITUACIÓN ACTUAL DEL ÁREA DE GENERACIÓN

En el siguiente apartado se explicará la modalidad de operación, de la planta térmica, la cual es la encargada de proveer vapor tanto para los turbogeneradores de extracción como para el de condensación, así mismo es el área encargada de proveer el vapor para la fábrica de azúcar luego de su agotamiento en las turbinas de extracción.

2.1. Operación actual

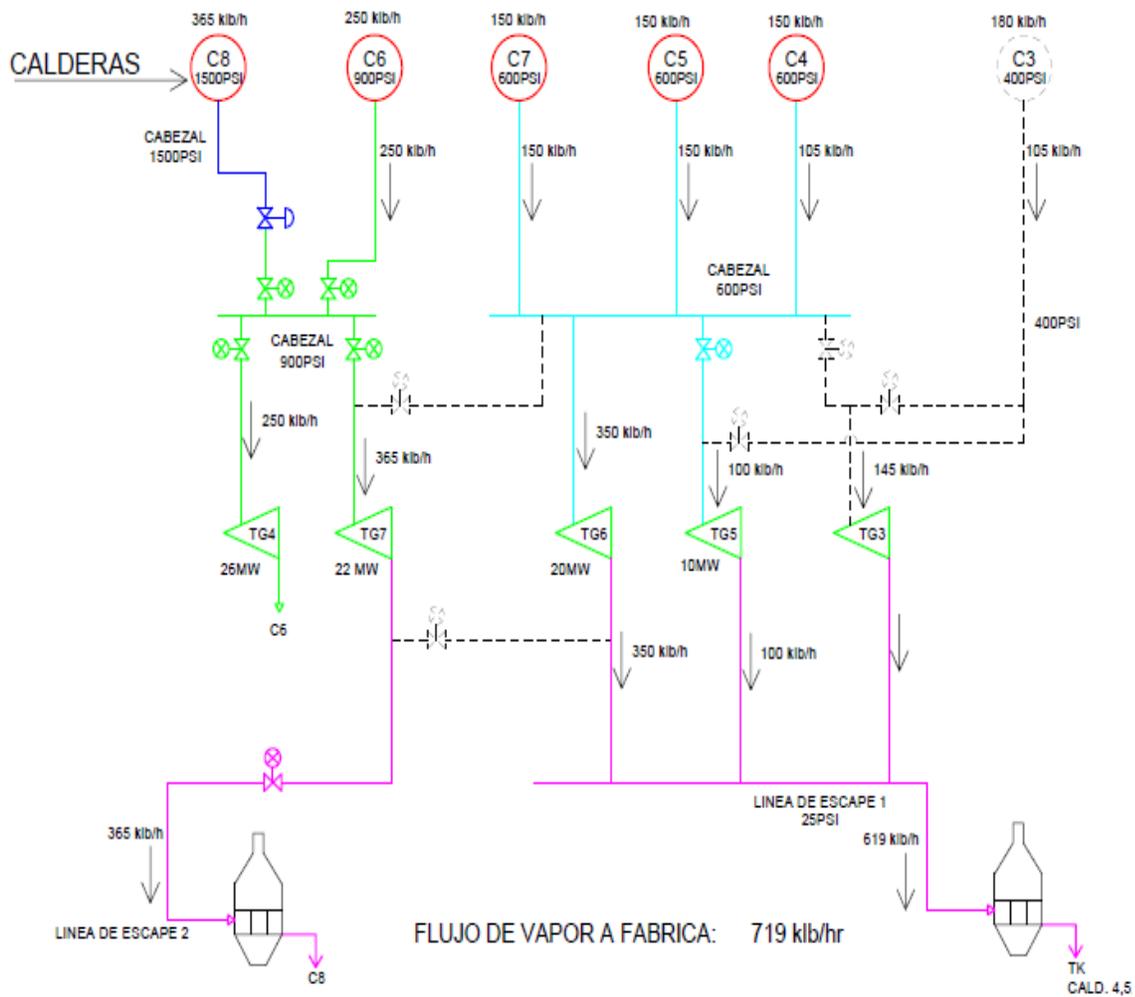
La operación actual del área de generación de energía de la empresa en estudio se describe a continuación en dos áreas productivas las cuales son: producción de vapor y producción de energía. Combinando estas dos áreas se genera la energía eléctrica para consumo interno como para la venta al SNI.

Actualmente se cuenta con esquema de operación en el cual tres calderas de 600 psi las cuales proveen 204 TPH de vapor hacia dos turbogeneradores los cuales son de una potencia de 20 y 10 MW respectivamente. Así mismo se cuenta con una caldera de 900 Psi. la cual provee un flujo hacia un turbogenerador condensación de 26 MW siendo el flujo de vapor de dicha caldera de 113 TPH.

Se cuenta con una caldera de 1500 Psi la cual provee 136 TPH de vapor hacia un turbogenerador de extracción de 22 000 kW. Con esta operación se tiene una generación de energía de 73 000 kWh con un consumo de vapor del ciclo de extracción de 340 TPH y un consumo de vapor en el ciclo condensación

de 113 TPH. En la figura 1 se muestra el esquema completo de generación de energía.

Figura 1. Esquema de operación actual



Fuente: elaboración propia.

2.1.1. Área de producción de vapor

El área de producción de vapor cuenta con seis calderas las cuales son las encargadas de producir el vapor que es utilizado para el movimiento de las turbinas de la cuales una caldera se encuentra en *stand by* si existiese alguna contingencia. Se cuenta con una caldera de 400 psi la cual está en *stand by*, tres calderas de 600 PSI, una caldera de 900 PSI y una caldera de alta presión de 1500 psi.

2.1.2. Área de producción de energía

El área de producción de energía es la encargada de convertir la energía cinética del vapor en energía eléctrica con las unidades turbogeneradoras, así mismo es el área encargada de proveer el vapor a la fábrica para la producción de azúcar.

2.2. Planteamiento del problema

Actualmente el sistema de generación de energía de la empresa en estudio se ha observado que su productividad puede mejorar esto se ha identificado debido a que cuenta sus unidades turbogeneradoras que carece de tecnología de punta, esto quiere decir tiene un alto consumo de vapor para generar energía eléctrica.

El contar con este tipo de equipos conlleva tener personal operativo controlando cada una de estas unidades antiguas, por lo que se ha observado que con los turbogeneradores modernos no es necesario tener controlando la unidad turbogeneradora, por otra parte, se ha comparado el consumo de vapor tanto de las unidades antiguas que tienen consumos de vapor desde 9 kg/kW

hasta 14 kg/kW mientras que la unidad más moderna siendo esta de 22 MW tiene un consumo específico de vapor de 5.9 kg/kW.

2.3. Alcance de la propuesta

La investigación se realizará en una empresa agroindustrial, la cual sus principales actividades económicas son: la producción de edulcorantes y la generación de energía eléctrica. El desarrollo de la investigación se realizará en el área de generación de energía la cual es una de las grandes áreas de producción de la industria en estudio.

Por lo tanto, la presente investigación tiene un alcance para mejorar la productividad de la empresa únicamente en el área de generación de energía para lo cual pretende analizar una mejora en el aprovechamiento del consumo de vapor de las unidades generadoras.

3. ANÁLISIS TÉCNICO DE LOS EQUIPOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA

En el presente capítulo se dará a conocer las especificaciones técnicas de los equipos de generación de vapor como también de los equipos de generación de energía. La presente información será estudiada para conocer a profundidad la modalidad de operación de la industria.

3.1. Calderas

Actualmente la empresa cuenta únicamente con calderas acuatubulares las cuales se dividen en dos grupos con una denominación propia de la empresa en estudio las cuales son calderas de baja presión y calderas de alta presión.

3.1.1. Calderas de baja presión

Para este estudio se denominan calderas de baja presión a aquellas calderas que están por debajo de los 600 PSI de presión, esta es una denominación perteneciente a la industria en estudio

En la actualidad se cuenta con una caldera de 400 PSI la cual es una caldera que se encuentra en *stand-by*, así mismo se cuentan con tres calderas que trabajan a una presión de 600 PSI; la característica de dichas calderas se muestra en la tabla II.

Tabla II. **Calderas de baja presión**

Unidad	Presión (PSI)	Flujo de vapor (TPH)
Caldera 3	400	82
Caldera 4	600	59
Caldera 5	600	68
Caldera 7	600	68

Fuente: elaboración propia.

3.1.2. Calderas de alta presión

Se denominan calderas de alta presión a las calderas que su presión de operación está por encima de las 800 PSI. En la tabla III se muestra las especificaciones de cada una de las calderas de alta presión con las que cuenta el ingenio en estudio.

Tabla III. **Calderas de alta presión**

Unidad	Presión (PSI)	Flujo de vapor (TPH)
Caldera 6	900	113
Caldera 8	1500	165

Fuente: elaboración propia.

3.2. Turbogeneradores

El término turbogenerador es muy utilizado en la industria azucarera. Turbogenerador es el conjunto turbina - generador el cual es el encargado de convertir la energía cinética del vapor producido por una caldera en energía mecánica que a su vez es convertida en energía eléctrica con un alternador. Se puede definir dos tipos de turbogeneradores en la industria azucarera los cuales son: turbogeneradores de condensación y contrapresión

3.2.1. Turbogeneradores de condensación

Las turbinas de condensación son las más utilizadas en las centrales termoeléctricas. Suelen ser de mayor tamaño y se requieren de un condensador, regularmente la presión de descarga de dichas turbinas suele ser inferior a la presión atmosférica esto debido a la condensación del vapor. En la industria azucarera estas son de gran utilidad para la generación de energía eléctrica en la temporada de no zafra.

3.2.2. Turbogeneradores de extracción

Las turbinas de extracción también son llamadas turbinas de escape. Define Velásquez, (2015) que las turbinas de contrapresión se utilizan para expandir, y de esta forma reducir la presión del vapor generando, y al mismo tiempo la energía mecánica y luego descargan el vapor a una presión aún elevada, para ser utilizado en procesos industriales. Por lo que queda claro que estas turbinas son utilizadas cuando existe un uso posterior del vapor en un proceso industrial.

3.2.3. Turbogeneradores combinados (extracción- condensación)

Turbinas que pueden trabajar en ambas formas. Estas turbinas son de gran utilidad debido a que se puede aprovechar cierta parte del vapor agotado en la turbina para un subproceso y el vapor restante se puede condensar para la recuperación de su agua. Se evaluará esta tecnología por su versatilidad para ser aprovechado el vapor ya sea en ciclo condensación o ciclo de contrapresión.

3.2.4. Turbogeneradores instalados

La instalación actual cuenta con cinco turbogeneradores de los cuales un turbogenerador es de condensación y los cuatro restantes son de contrapresión.

3.2.4.1. Turbogenerador #4 GE 26MW

Turbogenerador de condensación el cual trabaja con una presión de 850 PSI y una temperatura de 800 °F con una potencia de diseño de 26 MW, las características de la turbina se pueden observar en la siguiente figura.

Figura 2. Turbogenerador GE 26 MW



Fuente: [Fotografía de Luis René Vidal Zenteno]. (Santa Lucía Cotzumalguapa, Escuintla. 2022). Colección particular. Guatemala

3.2.4.2. Turbogenerador #7 SNM-BRUSH 22MW

El presente turbogenerador, es una máquina que está diseñada para trabajar en dos diferentes presiones, las cuales son 900 y 600 PSI, esto para tener la versatilidad de poder operar la unidad generadora con las calderas de baja presión o bien con la caldera de alta presión, a continuación, se muestra la unidad instalada.

Figura 3. **Turbogenerador SNM 22MW**



Fuente: [Fotografía de Luis René Vidal Zenteno]. (Santa Lucía Cotzumalguapa, Escuintla. 2022). Colección particular. Guatemala.

3.2.4.3. **Turbogenerador #6 TGM 20MW**

El turbogenerador marca TGM, el cual opera a una presión de 600 PSI es decir trabaja actualmente con las calderas de baja presión, esta unidad genera una potencia máxima de 20 MW y es tecnología extracción, esta unidad se encuentra en *stand By*, por si ocurriera alguna contingencia con el turbogenerador SNM. En la siguiente figura se muestra la unidad instalada.

Figura 4. Turbogenerador TGM 20MW



Fuente: [Fotografía de Luis René Vidal Zenteno]. (Santa Lucía Cotzumalguapa, Escuintla. 2022). Colección particular. Guatemala

3.2.4.4. Turbogenerador Westinghouse #5 10MW

El turbogenerador en mención es una unidad de 10 MW el cual tiene la versatilidad de poder trabajar en 600 como en 400 PSI, actualmente de una de las maquina más ineficientes ya que tiene un consumo específico de vapor de 11.34 kg/kW, esto debido por su antigüedad. A continuación, se muestra el turbogenerador instalado en la planta.

Figura 5. **Turbogenerador Westinghouse 10 MW**

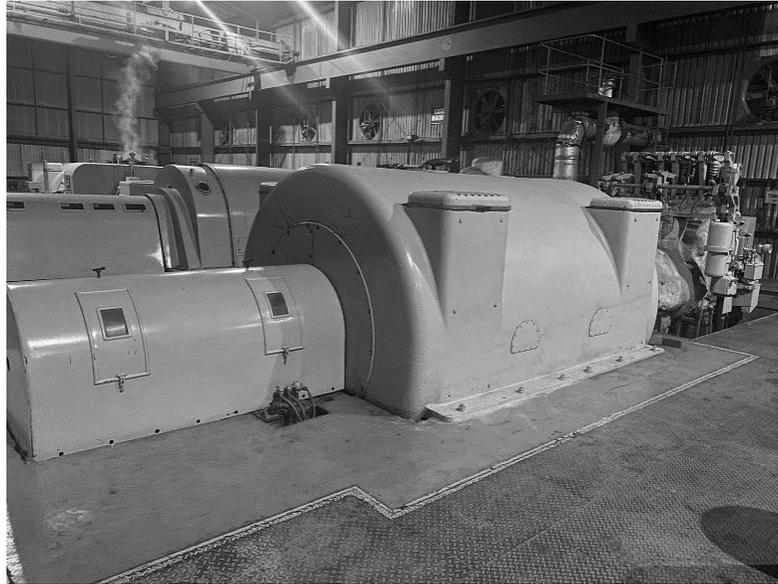


Fuente: [Fotografía de Luis Rene Vidal Zenteno]. (Santa Lucia Cotzumalguapa, Escuintla. 2022). Colección particular. Guatemala

3.2.4.5. Turbogenerador #3 GE 7.5MW

Esta unidad actualmente se encuentra en *stand By*, al igual que el turbogenerador Westinghouse es de los más antiguos e ineficientes, actualmente se ha observado que tiene un consumo específico de vapor de 13.60 kg/kW por lo que para producir su máxima potencia consume 102 kgh y debido a esto, la unidad no es utilizada en la actualidad. En la siguiente figura se muestra la unidad instalada en el área de casa de máquinas de la empresa en estudio.

Figura 6. **Turbogenerador GE 7.5 MW**



Fuente: [Fotografía de Luis René Vidal Zenteno]. (Santa Lucía Cotzumalguapa, Escuintla. 2022). Colección particular. Guatemala

3.2.5. Capacidad instalada de generación de energía

Actualmente se cuenta con una capacidad instalada de 85.5 Mw tomando en cuenta ambos tipos de turbogeneradores, tanto condensación como extracción.

Se cuenta con una capacidad instalada de seis calderas las cuales tienen una producción de vapor de 566 TPH de vapor. Este dato tomando en cuenta la caldera que se encuentra *stand By*.

3.2.6. Eficiencias de turbogeneradores

Le eficiencia de los turbogeneradores es medida respecto a al consumo de vapor de las turbinas respecto la cantidad de energía que producen. A esta relación se le llama consumo específico (C.E.). en la tabla IV se muestra el detalle de la eficiencia de las turbinas instaladas.

Tabla IV. **Consumo específico turbogeneradores**

Turbogeneradores	Potencia (kW)	C.E. (kg/kW) a 600 Psi	C.E. (kg/kW) a 900 Psi
Turbogenerador 3	7 500	10	-
Turbogenerador 4	26 000		4.4
Turbogenerador 5	10 000	11	-
Turbogenerador 6	20 000	8.2	6.8
Turbogenerador 7	22 000	7.72	6

Fuente: elaboración propia.

3.3. Producción de energía térmica

Actualmente se cuenta con una producción de vapor como se muestra en la siguiente tabla, la cual muestra la combinación de la caldera y el turbogenerador al que le provee el vapor para la producción de energía.

Cabe mencionar que se trabaja con la caldera de 1 500 PSI, pero se tiene una reducción de presión para que esta pueda trabajar adecuadamente con un turbogenerador de 900 PSI.

3.4. Producción de energía eléctrica

Actualmente se tiene una producción de energía máxima de 71 000 kWh con las calderas anteriormente mencionadas, en la siguiente figura se muestra el esquema de operación con su respectivo balance energético.

3.4.1. Generación de energía bruta

Se le llama generación bruta a la generación total tanto para consumo interno como para venta al SNI.

3.4.2. Consumo interno industrial

Se tiene un consumo interno de energía eléctrica de 30 000 kWh lo cual es utilizado para la fábrica de azúcar como también para los consumos de equipos auxiliares de generación de energía.

3.4.3. Venta de energía al SNI

La producción restante de energía eléctrica es vendida al AMM bajo un contrato firme de 26 000 kWh y 15 000 kWh venta al mercado Spot. Cabe mencionar que el precio del mercado spot es variable y en los últimos dos años el precio promedio a estado alrededor en 51 US\$/MWh.

3.5. Modelo de operación propuesto

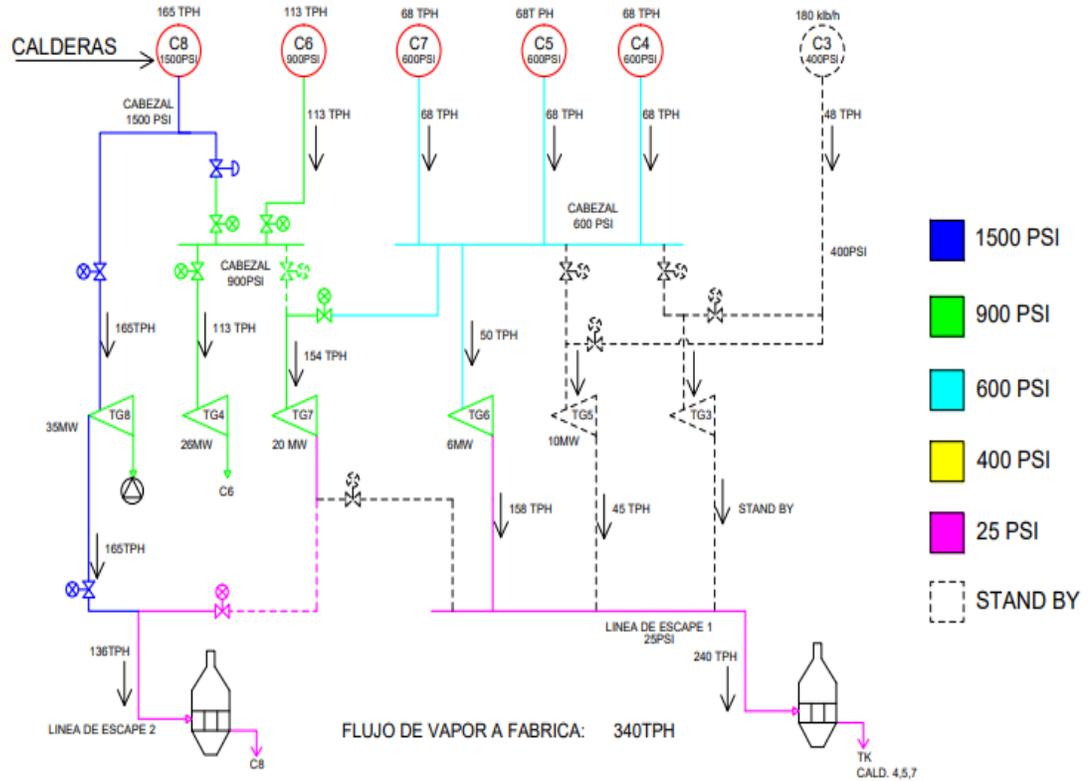
El modelo de operación que se propone es el siguiente:

- Caldera 8, 1500 PSI, flujo de vapor de 165 TPH con turbogenerador con tecnología extracción condensación de 46 000 kW, que para poder proveer vapor para la producción de azúcar trabajaría un 80 % de su capacidad siendo esta 35 000 kW, debido a que el C.E. de la turbina trabajando en puramente extracción es de 4.77 kg/kW esto dado que la caldera no tiene la posibilidad de producir más vapor.
- Tres calderas de 600 Psi, con flujo de vapor total de 204 TPH con turbogeneradores de extracción TG7 y TG6 siendo la distribución de generación de ambas unidades de 20 000 kW y 6 000 kW respectivamente
- Caldera 6, 900 PSI, con flujo de vapor de 113 TPH con un turbogenerador de condensación TG4 de 26 000 kW.

Con este modelo de operación se obtendrá una generación de 87 000 kW de las cuales 30 000 kW son de consumo interno de la fábrica, y 57 000 kW para venta al SNI. Con este modelo de operación se percibe un aumento en la generación de energía de 16 000 kW siendo este un 22.5 % de aumento de generación por zafra.

En la siguiente figura se muestra el esquema operativo.

Figura 7. Esquema de operación propuesto con turbogenerador extracción-condensación



Fuente: elaboración propia.

4. RESULTADOS

4.1. Especificaciones y requerimientos para adquirir equipos modernos de generación de energía

Como resultado de la investigación se lograron encontrar distintas propuestas de los equipos de generación más actualizados hoy en día, por lo que a continuación se presenta la tabla V la cual muestra las especificaciones de las turbinas generadoras investigadas:

Tabla V. **Especificaciones de turbinas**

Marca Turbina	UN	SIEMENS		SNM CO		TGM	
Operación		Extracción	Cond.	Extracción	Cond.	Extracción	Cond.
Potencia Turbina	kW	32,400	46,250	31,350	46,000	32,060	46,065
Flujo de entrada	TPH	165		165		165	

Fuente: elaboración propia.

Como se puede apreciar se cuentan con tres marcas reconocidas a nivel mundial las cuales son SIEMENS, SNM CO, y TGM. Por lo observado se puede apreciar que ambas máquinas proporcionan la misma cantidad de energía para un mismo flujo de vapor.

Como se puede observar en la tabla VI el complemento de la turbina pueden ser dos tipos de marcas las cuales, con SIEMENS y BRUSH, que como es el caso de las turbinas, en Guatemala los ingenios azucareros han optado por utilizar la marca BRUSH por sus precios de competencia y su alta capacidad de adaptación a diferentes turbinas.

Tabla VI. **Especificaciones generadores**

Marca Generador	UN	SIEMENS	BRUSH	BRUSH
Potencia generador	kVA	57,500	57,500	57,500
Potencia generador	kW	46,000.00	46,000.00	46,000.00
Factor de potencia		0.80	0.80	0.80

Fuente: elaboración propia.

En la tabla VII se puede observar los precios tanto de las turbinas como de los generadores, así mismo se hace referencia a equipo complementario que incluye la adquisición de este activo como lo son repuestos críticos de y accesorios eléctricos como paneles de control y paneles eléctricos.

Tabla VII. **Precios de oferentes turbogeneradores**

Aspecto	SIEMENS	SNM CO	TGM
Turbina	\$7,001,664.00	\$5,163,000.00	\$5,687,500.00
Generador	\$2,229,550.00	\$2,116,745.00	\$2,116,745.00
Repuestos turbina/generador	\$211,259.00	\$139,000.00	Incluido
Accesorios eléctricos	Incluido	\$317,000.00	Incluido
CIF	\$823,106.00	\$350,000.00	\$530,000.00
Precio FOB	\$9,442,473.00	\$7,735,745.00	\$7,804,245.00
Precio CIF Sto. Tomas de Castilla	\$10,265,579.00	\$8,085,745.00	\$8,334,245.00

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Costos de inversión total**

Aspecto	SIEMENS	SNM CO	TGM
Turbina	\$7,001,664.00	\$5,163,000.00	\$5,687,500.00
Generador	\$2,229,550.00	\$2,116,745.00	\$2,116,745.00
Repuestos turbina/generador	\$211,259.00	\$139,000.00	Incluido
Accesorios eléctricos	Incluido	\$317,000.00	Incluido
Impuestos y fletes	\$823,106.00	\$350,000.00	\$530,000.00
Modulo a casa de maquinas	\$200,000.00	\$200,000.00	\$200,000.00
Tablero eléctrico	\$300,000.00	\$300,000.00	\$300,000.00
Cable eléctrico y accesorios	\$250,000.00	\$250,000.00	\$250,000.00
Tubería de vapor y accesorios	\$150,000.00	\$150,000.00	\$150,000.00
Aislamiento térmico	\$100,000.00	\$100,000.00	\$100,000.00
Instrumentación	\$75,000.00	\$75,000.00	\$75,000.00
Imprevistos	\$500,000.00	\$500,000.00	\$500,000.00
Mano de obra instalación	\$350,000.00	\$350,000.00	\$350,000.00
Total inversión	\$12,190,579.00	\$10,010,745.00	\$10,259,245.00

Fuente: elaboración propia.

4.2. Factores clave de éxito que ayuden a mejorar el esquema de operación

Para la identificación de los FCE se analizaron los objetivos empresariales, esto bien para entender con certeza los objetivos a corto, mediano y largo plazo, con esto se busca mejorar la productividad de la generación de energía y así poder competir en el mercado eléctrico.

4.2.1. Sostenibilidad empresarial

Uno de los factores buscados es la sostenibilidad de la empresa, por lo cual se pretende realizar una inversión para poder producir energía renovable de una manera más eficiente. Por lo que Varias proyecciones indican que los

recursos de energías renovables son las fuentes de energía más rápidas en el mundo actual. Se prevé una gran influencia de estos recursos en el futuro.

4.2.2. Medio ambiente

La inversión en nuevas tecnologías para la reducción del impacto ambiental sobre la calidad del aire. Filtros en chimeneas de calderas. Sistemas de monitoreo de velocidad y dirección del viento para la reducción de partículas y cenizas en el aire.

4.2.3. Excelencia operacional

Este factor nos da a entender que se tendrá que incrementar la productividad industrial, esto bien con el lema hacer más con menos por lo que esto impacta directamente con la elaboración de este proyecto, ya que efectivamente se producirá más energía con menos máquinas y menos personal operativo y de este modo aumentar la productividad industrial.

4.2.4. Innovación y tecnología

Con este aspecto fundamental se mejorará la competitividad de la empresa a través de proyectos de innovación, esto con el lema hacer lo mismo, pero de diferente forma.

4.3. Normativa para que exista un procedimiento de operación.

El poder alcanzar este objetivo, llevo a cabo un análisis extenso de la normativa ISO 9001 2015, ya que dicha norma establece una organización para mantener y mejorar continuamente el sistema de calidad, por lo que menciona la

elaboración de procedimientos de operación para asegurar la gestión de la calidad de la empresa.

4.4. Productividad de la empresa

La productividad actual con la que cuenta el área de generación de energía se calcula de forma directa con la producción de vapor versus la generación de energía total.

$$\text{Productividad} = \frac{\text{Vapor Producido (kgph)}}{\text{Energía Producida (kWh)}}$$

$$\text{Productividad actual} = \frac{482\,000 \text{ kgph}}{71\,000 \text{ kWh}}$$

$$\text{Productividad actual} = 6.78 \text{ kg/kW}$$

Por lo que este dato nos indica que para poder producir un kW de energía se es necesario 6.78 kg de vapor.

De hacerse la inversión por el turbogenerador extracción condensación la productividad esperada sería.

$$\text{Productividad esperada} = \frac{482\,000 \text{ kgph}}{87\,000 \text{ kWh}}$$

$$\text{Productividad esperada} = 5.54 \text{ kg/kW}$$

Lo que nos indica este dato es que será una planta más eficiente debido a que se va a generar más energía con la misma cantidad de vapor que se produce actualmente en la planta de generación

4.5. Análisis financiero

Menciona Aguirre (1981), que el análisis financiero incluye los siguientes puntos.

- VPN
- Relación costo/beneficio
- TIR

Para el desarrollo de esta inversión se tomará en cuenta que el flujo de efectivo del precio de energía será el promedio del precio spot de la energía el cual es \$ 51 MWh, así mismo se tomara en cuenta que el ingreso de son únicamente en época de zafra es decir 200 días de noviembre a mayo, para el cual el flujo del proyecto será como lo muestra la tabla. En el anexo 4 se presenta el flujo de efectivo completo de la inversión.

Tabla IX. **Flujo de efectivo de inversión**

Periodo	Flujo
0	-\$10,010,745.00
1	\$0.00
2	\$2,188,867.20
3	\$2,188,867.20
4	\$2,188,867.20
5	\$2,188,867.20
6	\$2,188,867.20
7	\$2,188,867.20
8	\$2,188,867.20
9	\$2,188,867.20
10	\$2,188,867.20

Fuente: elaboración propia.

Para el cálculo del TIR tomamos en cuenta que el primer año no abra retorno de inversión debido que será el año de ejecución del proyecto se toma como base la tabla XI para hacer el cálculo.

Usando la ecuación 1 se determinó que:

$$\text{TIR} = 12.85 \%$$

Para el cálculo de VPN se utilizaron los datos de la tabla IX, así mismo utilizando se utilizó la función VNA de Excel para facilitar el cálculo, para el cálculo de este indicador financiero se tomó una tasa del 12 % en un periodo de diez años para lo cual arrojó lo siguiente:

$$\text{VAN} = \$ 402,497.15$$

Es importante mencionar que para el flujo de efectivo de este proyecto no se toma en cuenta el impuesto de ISR ya que menciona el Decreto 52-2003 Artículo 5 que aquellos proyectos de energía renovable están exentos del impuesto ISR por diez años.

Para determinar el tiempo de retorno de la inversión se utilizará el concepto PRI (periodo de la recuperación de la inversión) el cual se mencionó en los capítulos anteriores y haciendo uso de la ecuación se determinó que:

$$\text{PRI} = 5 \text{ Años}$$

El flujo de efectivo utilizado para el cálculo del PRI lo puede encontrar en el anexo 6.

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Respondiendo a la pregunta auxiliar número uno la cual cuestiona cuáles serán las especificaciones y requerimientos que se deben proponer para adquirir equipos de generación de energía modernos y derivado de los datos obtenidos en la investigación se presenta lo siguiente.

Según los datos mostrados en el capítulo anterior se ha optado por adquirir la turbina marca SNM CO debido a que en Guatemala la mayor parte de la industria azucarera cuenta con este tipo de turbinas y debido a esto se supone que abra mayor disponibilidad de repuestos críticos de estas máquinas. Así mismo cabe mencionar que la marca SNM CO es el mejor oferente de acuerdo con los resultados presentados anteriormente.

De lo antes mencionado se evaluó que la inversión más viable es el conjunto SNM CO y BRUSH para obtener un turbogenerador completo de generación de energía eléctrica de 46 000 kW con un consumo de vapor de 165 TPH, es decir un rendimiento de generación en ciclo condensación de 3.5 kg/kW, y un rendimiento de generación en ciclo extracción de 5.27 kg/kW. Así mismo se determinó que es el oferente con menor precio de inversión tendrá un valor de \$ 10, 010,745.

Debido a la segunda pregunta de investigación la cual hace referencia a cuáles son los FCE que ayuden a mejorar el esquema de operación, se determinó los cuatro factores que se mencionan en el capítulo anterior esto debido a que son en los que más impacto tiene el proyecto siendo estos FCE: sostenibilidad empresarial, medio ambiente, excelencia operacional e innovación y tecnología.

Respondiendo a la tercera pregunta de investigación la cual cuestionaba una normativa que se pudiera analizar para que existan procedimientos de operación se logró determinar lo siguiente, con base en lo anterior mencionado el capítulo de resultados y debido a que en la actualidad la empresa la cual está sometida al estudio está certificada por ISO 9001-2015 se analizó este normativo para poder, actualizar o hacer nuevos procedimientos de operación debido a que se contara con equipos nuevos y modernos de generación de energía eléctrica

Respondiendo a la pregunta central de la investigación la cual cuestionaba si era factible la adquisición de un turbogenerador extracción condensación para mejorar la productividad. Se observó que según los resultados expuestos en el apartado anterior la productividad mejora un 18 % por los que con las mismas unidades productora de vapor es posible generar 16 000 kWh extras si se instalara una unidad con la tecnología ya mencionada

Así mismo se sabe que se tiene un retorno de la inversión del 12.85 %, así mismo se determinó que la inversión se recupera en cinco periodos de zafra y un restante de dos meses de la cuarta zafra.

CONCLUSIONES

1. Las especificaciones y requerimientos para la adquisición de esta máquina extracción condensación son, que puedan operar a una presión de operación de 1500 PSI, temperatura de vapor de 1000 °C, flujo de másico de vapor de 165 Tph, un consumo específico de 5 kg/kW y una potencia de turbina – generador de 45 000 kW
2. Se identificaron los FCE mediante la investigación de las políticas de la empresa los cuales fueron: sostenibilidad empresarial, medio ambiente, excelencia operacional e innovación, estos son los pilares fundamentales para mantener la productividad y mantener la competitividad empresarial
3. Debido a la certificación ISO 9001:2015 se observó la aplicabilidad de esta normativa para la actualización de los procedimientos de operación.
4. Para mejorar la productividad de la empresa se propone la adquisición de una unidad turbogeneradora extracción-condensación, derivado de su versatilidad de operación, así mismo ya que tiene un consumo específico por debajo de todas las unidades generadoras con las que cuenta la empresa en estudio.

RECOMENDACIONES

1. Adquirir un turbogenerador extracción-condensación marca SNM Co. con una presión de operación de 1500 psi, temperatura de operación de 1000 °C, flujo de masico de vapor de 165 Tph, un consumo específico de 5 kg/kW y una potencia de turbina – generador de 45 000 kWh.
2. Debido a que los FCE son variables en el tiempo es necesario realizar un análisis semestral de los mismos para mantener actualizados los esquemas de operación.
3. Hacer uso de los incentivos que otorga la ley general de electricidad para los nuevos agentes generadores con energía renovable.
4. De los resultados obtenidos por los índices financieros, es necesario realizar la inversión en los próximos dos años, debido que esto dará a la empresa mayor rentabilidad y sostenibilidad en el tiempo.

REFERENCIAS

1. Aguirre, J. (1981). *Introducción a la evaluación económica y financiera de inversiones agropecuarias*. San José, Costa Rica: IICA.
2. Chain, N. (2011). *Proyectos de Inversión. Formulación y evaluación*. Santiago de Chile, Chile: Pearson
3. Decreto 52-2003. *Ley de incentivos para el desarrollo de proyectos renovables*. Diario de Centroamérica. Guatemala. 10 de noviembre de 2003
4. Hernández, R.; Fernández, C. y Baptista, Pilas. *Metodología de la Investigación*. (6ª edición). México: McGraw-Hill. Recuperado de <https://www.uca.ac.cr/wpcontent/uploads/2017/10/Investigacion.pdf>.
5. Muñoz, M. (2015). *Guía para determinar y reducir pérdidas de energía en generadores de vapor*. Guatemala: CENGICANA. Recuperado de <https://cengicana.org/info/guia-para-determinar-y-reducir-perdidas-de-energia-en-generadores-de-vapor>.
6. Muñoz, M. y Rovira, A. (2014). *Máquinas Térmicas*. Madrid, España: UNED. Recuperado de https://kupdf.net/download/maquinas-termicas-marta-muoz-dominguezpdf_5a26e484e2b6f5c81919f0ea_pdf.

7. Velásquez, A. (2015). *Montaje de un turbogenerador de contra presión de 22 MW para asegurar la continuidad de operación del Ingenio La Unión* (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Recuperado de <http://www.repositorio.usac.edu.gt/3018/1/Amilcar%20Estuardo%20Vel%C3%A1squez%20Alonzo.pdf>.

8. Velásquez, L. (2007). *Estudio de mejora de la condición de operación en una turbina de vapor Elliott modelo DYR*. (Tesis de maestría). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Recuperado de <http://www.repositorio.usac.edu.gt/5065/1/LUIS%20ALBERTO%20VEL%C3%81SQUEZ%20AGUILAR.pdf>.

APÉNDICES

Apéndice 1. Características Turbogenerador Siemens

		SIEMENS	
		zafra	no zafra
Potencia de la turbina	kW	32,400	46,250
Modelo		SST-600	
Tolerancia de construcción	%		cero
peso de la turbina	lb	198,000	
Flujo de vapor de entrada	kLb/h	364.78	364.78
Presión de vapor de entrada	Psia	1515.9	1,515.9
Temperatura de vapor de entrada	°F	1000	1,000
entalpia del vapor de entrada	BTU/lb	1489.6	1,489.6
entalpia del agua de alimentación	BTU/lb	377.92	377.92
Gross heat rate	BTU/kWh	12,516.01	8,767.97
Flujo de vapor de la extracción	kLb/h	286.70	0.00
Fujo agua condensador @272,800 lb/h	gpm	27,142	
Superficie del condensador	ft 2	34,485	
Marca		SIEMENS	
Potencia del generador	kVA	57,500	
Frame		DGen6-100A-2P 075-24 M07	
Eficiencia del generador	%	98.00	98.10
Peso del generador	lb	186,120	
power factor		0.80	
Técnico para montaje	US\$/dia	750	
hora extra	US\$/dia	140	
forma de pago	%	20-20-15-35-10	

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Características Turbogenerador SNM CO

		SNM CO	
		zafra	no zafra
Potencia de la turbina	kW	31,350	46,000
Modelo		C10-R15-EN	
Tolerancia de construcción	%	(+/-) 2	(+/-) 2
peso de la turbina	lb	176,000	
Flujo de vapor de entrada	kLb/h	363.76	363.76
Presión de vapor de entrada	Psia	1,516	1,516
Temperatura de vapor de entrada	°F	1,000	1,000
entalpia del vapor de entrada	BTU/lb		
entalpia del agua de alimentación	BTU/lb		
Gross heat rate	BTU/kWh	12,555	8,801
Flujo de vapor de la extracción	kLb/h	282.35	
Fujo agua condensador @272,800 lb/h	gpm	34,784	
Superficie del condensador	ft 2	24,477	
Marca		BRUSH	
Potencia del generador	kVA	57,500	
Frame		BDAX 7-290 ERH	
Eficiencia del generador	%	98.00	98.10
Peso del generador	lb	209,000	
power factor		0.80	
Técnico para montaje	US\$/día	1,100 (turbina)- 2,100 (gen)	
hora extra	US\$/día	390	
forma de pago	%	Carta de crédito	

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. Características Turbogenerador TGM

		TGM	
		zafra	no zafra
Potencia de la turbina	kW	32,060	46,065
Modelo		CTE 63	
Tolerancia de construcción	%		1
peso de la turbina	lb	150,000	
Flujo de vapor de entrada	kLb/h	363.76	363.76
Presión de vapor de entrada	Psia	1,516.00	1,516.00
Temperatura de vapor de entrada	°F	1,000	1,000
entalpia del vapor de entrada	BTU/lb	1488.97	1488.97
entalpia del agua de alimentación	BTU/lb	380.08	380.86
Gross heat rate	BTU/kWh	12,581.68	8,750.35
Flujo de vapor de la extracción	kLb/h	282.35	
Fujo agua condensador @272,800 lb/h	gpm	28,000	
Superficie del condensador	ft 2	25,424	
Marca		BRUSH	
Potencia del generador	kVA	57,500	
Frame		DBDAX 7-290 ERH	
Eficiencia del generador	%		
Peso del generador	lb		
power factor		0.80	
Técnico para montaje	US\$/dia		
hora extra	US\$/dia		
forma de pago	%	10-20-10-10-10-10-10-10-10-10-10	

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. Flujo de efectivo inversión del turbogenerador

Flujo de efectivo turbogenerador nuevo											
Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
INVERSIÓN INICIAL	\$10,010,745										
FLUJO DE EFECTIVO OPERATIVO ADICIONAL											
Incremento en utilidades brutas		\$2,521,440	\$2,521,440	\$2,521,440	\$2,521,440	\$2,521,440	\$2,521,440	\$2,521,440	\$2,521,440	\$2,521,440	\$2,521,440
Diferencial de depreciación		\$250,000	\$250,000	\$250,000	\$250,000	\$250,000	\$250,000	\$250,000	\$250,000	\$250,000	\$250,000
Utilidad antes de impuestos		\$2,771,440	\$2,771,440	\$2,771,440	\$2,771,440	\$2,771,440	\$2,771,440	\$2,771,440	\$2,771,440	\$2,771,440	\$2,771,440
Impuestos (12%)		\$332,573	\$332,573	\$332,573	\$332,573	\$332,573	\$332,573	\$332,573	\$332,573	\$332,573	\$332,573
Utilidad neta		\$2,438,867	\$2,438,867	\$2,438,867	\$2,438,867	\$2,438,867	\$2,438,867	\$2,438,867	\$2,438,867	\$2,438,867	\$2,438,867
Diferencial de depreciación		-\$250,000	-\$250,000	-\$250,000	-\$250,000	-\$250,000	-\$250,000	-\$250,000	-\$250,000	-\$250,000	-\$250,000
Flujo de efectivo operativo adicional		\$2,188,867	\$2,188,867	\$2,188,867	\$2,188,867	\$2,188,867	\$2,188,867	\$2,188,867	\$2,188,867	\$2,188,867	\$2,188,867
FLUJO DE EFECTIVO NETO ADICIONAL	-\$10,010,745	\$0	\$2,188,867	\$2,188,867	\$2,188,867	\$2,188,867	\$2,188,867	\$2,188,867	\$2,188,867	\$2,188,867	\$2,188,867

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. Flujo de efectivo inversión del turbogenerador con ISR

Flujo de efectivo turbogenerador nuevo											
Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
INVERSIÓN INICIAL	\$10,010,745										
FLUJO DE EFECTIVO OPERATIVO ADICIONAL											
Incremento en utilidades brutas		\$2,521,440	\$2,521,440	\$2,521,440	\$2,521,440	\$2,521,440	\$2,521,440	\$2,521,440	\$2,521,440	\$2,521,440	\$2,521,440
Diferencial de depreciación		\$250,000	\$250,000	\$250,000	\$250,000	\$250,000	\$250,000	\$250,000	\$250,000	\$250,000	\$250,000
Utilidad antes de impuestos		\$2,771,440	\$2,771,440	\$2,771,440	\$2,771,440	\$2,771,440	\$2,771,440	\$2,771,440	\$2,771,440	\$2,771,440	\$2,771,440
Impuestos (12%)		\$332,573	\$332,573	\$332,573	\$332,573	\$332,573	\$332,573	\$332,573	\$332,573	\$332,573	\$332,573
ISR (5%)		\$138,572	\$138,572	\$138,572	\$138,572	\$138,572	\$138,572	\$138,572	\$138,572	\$138,572	\$138,572
Utilidad neta		\$2,300,295	\$2,300,295	\$2,300,295	\$2,300,295	\$2,300,295	\$2,300,295	\$2,300,295	\$2,300,295	\$2,300,295	\$2,300,295
Diferencial de depreciación		-\$250,000	-\$250,000	-\$250,000	-\$250,000	-\$250,000	-\$250,000	-\$250,000	-\$250,000	-\$250,000	-\$250,000
Flujo de efectivo operativo adicional		\$2,050,295	\$2,050,295	\$2,050,295	\$2,050,295	\$2,050,295	\$2,050,295	\$2,050,295	\$2,050,295	\$2,050,295	\$2,050,295
FLUJO DE EFECTIVO NETO ADICIONAL	-\$10,010,745	\$0	\$2,050,295	\$2,050,295	\$2,050,295	\$2,050,295	\$2,050,295	\$2,050,295	\$2,050,295	\$2,050,295	\$2,050,295

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. Flujo de efectivo cálculo del PRI

	0	1	2	3	4	5	6	7
Flujo	-\$10,010,745.00	0	\$2,472,000.00	\$2,472,000.00	\$2,472,000.00	\$2,472,000.00	\$2,472,000.00	\$2,472,000.00
F Acumulado	-\$10,010,745.00	-\$10,010,745.00	-\$7,538,745.00	-\$5,066,745.00	-\$2,594,745.00	\$122,745.00	\$2,349,255.00	-\$122,745.00

Fuente: elaboración propia.