



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

**DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN PARA EL REDISEÑO DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN
DE VAPOR PARA COGENERAR ELECTRICIDAD EN UNA PLANTA PRODUCTORA DE
ACEITE DE PALMA, UTILIZANDO PRINCIPIOS DE REINGENIERÍA**

David Antonio Moya González

Asesorado por el Msc. Ing. Erik Javier Maldonado Velásquez

Guatemala, mayo 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN PARA EL REDISEÑO DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN
DE VAPOR PARA COGENERAR ELECTRICIDAD EN UNA PLANTA PRODUCTORA DE
ACEITE DE PALMA, UTILIZANDO PRINCIPIOS DE REINGENIERÍA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

DAVID ANTONIO MOYA GONZÁLEZ

ASESORADO POR EL MSC. ING. ERIK JAVIER MALDONADO VELÁSQUEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, MAYO 2023

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 Martinez
VOCAL III	Ing. José Milton De León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Inga. Adela María Marroquín González
EXAMINADOR	Ing. Sergio Alejandro Recinos
EXAMINADOR	Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN PARA EL REDISEÑO DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE VAPOR PARA COGENERAR ELECTRICIDAD EN UNA PLANTA PRODUCTORA DE ACEITE DE PALMA, UTILIZANDO PRINCIPIOS DE REINGENIERÍA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 11 de noviembre de 2022.


David Antonio Moya González



EEPFI-PP-1848-2022
Guatemala, 11 de noviembre de 2022

Director
Williams G. Álvarez Mejía
Escuela De Ingeniería Química
Presente.

Estimado Ing. Álvarez

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

El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado y aprobado el Diseño de Investigación titulado: **REDISEÑO DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE VAPOR PARA COGENERAR ELECTRICIDAD EN UNA PLANTA PRODUCTORA DE ACEITE DE PALMA, UTILIZANDO PRINCIPIOS DE REINGENIERÍA**, el cual se enmarca en la línea de investigación: **Área de Operaciones - Diseño e implementación de proyectos industriales**, presentado por el estudiante **David Antonio Moya González** carné número **9013359**, quien optó por la modalidad del **"PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO"**. Previo a culminar sus estudios en la Maestría en **ARTES en Gestión Industrial**.

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

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

Mtro. Erik Javier Maldonado Velasquez
Asesor(a)

Mtro. Carlos Humberto Aroche Sandoval
Coordinador(a) de Maestría

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

EEP.EIQ.1493.2022

El Director de la Escuela De Ingenieria Quimica de la Facultad de Ingenieria de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador y Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, del Diseño de Investigación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: **REDISEÑO DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE VAPOR PARA COGENERAR ELECTRICIDAD EN UNA PLANTA PRODUCTORA DE ACEITE DE PALMA, UTILIZANDO PRINCIPIOS DE REINGENIERÍA**, presentado por el estudiante universitario David Antonio Moya González, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingenieria en esta modalidad.

ID Y ENSEÑAD A TODOS



Ing. Williams G. Álvarez Mejía; Mg.I.Q., M.U.I.E.
Director
Escuela De Ingenieria Quimica

Guatemala, noviembre de 2022



Decanato
Facultad de Ingeniería
24189101- 24189102
secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

LNG.DECANATO.OI.446.2023

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN PARA EL REDISEÑO DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE VAPOR PARA COGENERAR ELECTRICIDAD EN UNA PLANTA PRODUCTORA DE ACEITE DE PALMA, UTILIZANDO PRINCIPIOS DE REINGENIERÍA**, presentado por: David Antonio Moya González, 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, mayo de 2023

AACE/gaoc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por permitirme culminar mi carrera.
Mis padres	David y Miriam, por su esfuerzo constante.
Mis hermanos	Estuardo y Sergio, por ser mi inspiración.
Mi esposa	Wendy, por su amor y dedicación sin límite.
Mis hijas	Debbie y Diana, mis motivos para todo.
Mis abuelos	David, Ángela, Carlos y Blanca (q.e.p.d.), por su guía, sabiduría y confianza permanente.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala Por la experiencia de aprendizaje

Mis amigos Erik Maldonado, Byron De la Peña, Nery Lique,
Oscar Rossal, Dinna Estrada y Víctor Monzón,
por su amistad y apoyo incondicional.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XIII
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	5
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	9
3.1. Descripción del problema	9
3.2. Descripción del problema	10
3.2.1. Pregunta central	10
3.2.2. Preguntas auxiliares	10
3.3. Delimitación del problema	11
3.3.1. Límite temporal	11
3.3.2. Límite geográfico	11
3.3.3. Límite espacial.....	11
3.3.4. Límite institucional	12
3.4. Viabilidad de la investigación.....	12
3.5. Consecuencias de realizar la investigación	12
4. JUSTIFICACIÓN	15

7.3.1.	Definición y concepción técnica.....	40
7.3.2.	Cogeneración con turbina de vapor.....	41
7.3.3.	Características de los componentes del sistema de distribución de vapor para cogeneración.....	42
7.4.	Reingeniería	44
7.4.1.	Antecedentes y marco conceptual.....	44
7.4.2.	Aplicación a los procesos industriales	45
7.4.3.	Fases de implementación	45
8.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS	47
9.	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	51
9.1.	Enfoque	51
9.2.	Diseño	51
9.3.	Tipo	52
9.4.	Alcance.....	52
9.5.	Variables e indicadores	52
9.6.	Operativización de las variables	54
9.7.	Fases de la investigación	55
9.7.1.	Fase uno: revisión documental.....	55
9.7.2.	Fase dos: diagnóstico.....	56
9.7.3.	Fase tres: definición de estrategia	56
9.7.4.	Fase cuatro: definición de evaluación de desempeño.....	57
9.8.	Población y muestra	57
10.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN.....	59
11.	CRONOGRAMA.....	61

12.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO	63
12.1.	Recursos	63
12.1.1.	Recursos humanos	63
12.1.2.	Recursos físicos	63
12.1.3.	Recursos tecnológicos	64
12.1.4.	Recursos financieros	64
13.	REFERENCIAS	65
14.	APÉNDICES	71

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Fases de la investigación	21
2.	Diagrama P-T para el agua	28
3.	Proceso de extracción de aceite de palma africana	38
4.	Diagrama sistema de cogeneración con turbina de vapor	42
5.	Cronograma de actividades.....	61

TABLAS

I.	Velocidad aceptada para flujo de vapor saturado en tuberías	36
II.	Velocidad recomendada para los distintos tipos de vapor	37
III.	Velocidad recomendada, según la presión de operación.....	37
IV.	Capacidad de trabajo del acero al carbón.....	43
V.	Matriz de variables	54
VI.	Detalle de costos de los recursos	64

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
°C	Grados centígrados (temperatura)
Kg/cm²	Kilogramos fuerza por centímetro cuadrado (presión)
Kg/h	Kilogramos por hora (flujo másico)
KwH	Kilowatts – hora (flujo de energía eléctrica)
m/s	Metros por segundo (velocidad)
P&ID	Siglas en inglés para diagrama de instrumentación y tubería
PSIg	Libras por pulgada cuadrada (presión manométrica)
Q	Quetzales

GLOSARIO

Agroindustria	Actividad económica basada en la producción, industrialización y comercialización de productos agrícolas, ganaderos, forestales y otros recursos naturales.
ASTM	Siglas en inglés de la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales
Biomasa	Se refiere a un tipo de energía renovable generada a partir de la combustión de materia orgánica.
Caldera	Máquina que produce vapor al calentar agua por el calor generado por algún combustible.
Calor específico	Cantidad de calor que debe suministrarse a una unidad de masa para elevar su temperatura en una unidad.
Calor de combustión	Cantidad de energía por unidad de masa que puede producirse por medio de una reacción de oxidación.
Calor latente	Cantidad de energía por unidad de masa, requerida por una sustancia para efectuar un cambio de fase.

Ciclo de Carnot	Ciclo de transferencia de calor que permite extraer calor de un medio para aportarlo a otro de menor temperatura, efectuando un trabajo en el medio.
Cogeneración	Sistema que produce calor y electricidad en una misma planta, con una única fuente de energía principal.
Condensación	Cambio de una sustancia del estado gaseoso al líquido.
Diagrama de fases	Representación gráfica de la relación entre las fases de una sustancia, en función de la temperatura, presión y composición.
Energía cinética	Energía que posee un cuerpo debido a su movimiento relativo.
Energía mecánica	Suma de energía cinética y potencial
Energía térmica	Parte de la energía interna de un sistema termodinámico en equilibrio, proporcional a su temperatura.
Entalpía	Cantidad de calor que un sistema termodinámico puede ceder o absorber, en relación con sus funciones de estado.

Estado de equilibrio	Estado en que las propiedades macroscópicas de un sistema están bien definidas y no varían.
Evaporación	Cambio de una sustancia del estado líquido al gaseoso.
Mesocarpio	Pulpa de un fruto
Sistema bifásico	Sistema en que una sustancia se encuentra en dos fases distintas a la vez.
Temperatura de saturación	Temperatura a la que un líquido cambia de fase líquida a gaseosa, o viceversa. Se refiere al punto de ebullición de una sustancia.

RESUMEN

El trabajo de investigación se centra en el análisis de las características de un sistema de distribución de vapor en una planta productora de aceite de palma africana, el cual debe ser rediseñado para que suministre vapor con los parámetros adecuados para cogenerar electricidad.

El rediseño del sistema se hará con la aplicación de los principios de reingeniería, de manera que se identifiquen los puntos críticos que requieren modificación, las condiciones del nuevo diseño, así como las características de los elementos del sistema que deben reemplazarse o agregarse.

Se analizarán los datos y parámetros del sistema de distribución de vapor, así como su relación e interacción con el proceso de producción de aceite, de manera que la inserción del proceso de cogeneración eléctrica no afecte la entrega energética ni la calidad del vapor a la planta.

Finalmente, se determinarán las características de los componentes para la distribución de vapor al proceso de cogeneración, así como la cantidad de vapor que puede ser dedicado al mismo. También se analizará el costo de dicho proceso y, con base en esto, se determinará el costo del kWh producido al utilizar vapor.

1. INTRODUCCIÓN

El vapor, como fuente energética, es uno de los recursos más importantes para procesos de transferencia de calor en la industria. La capacidad del agua para cambiar de estado de forma reversible cede, al condensarse, prácticamente toda la energía captada en el proceso de evaporación; esto permite repetir indefinidamente el ciclo de transferencia de calor y utilizarlo en múltiples aplicaciones industriales.

Si bien esta es la principal aplicación del vapor en la industria, es cada vez más frecuente su uso para generar electricidad por medio de turbinas de vapor, aprovechándolo primero en su condición de vapor sobrecalentado para impulsar la turbina, reduciendo su presión y luego utilizándolo como vapor saturado para los distintos procesos de intercambio energético. Esta es una de las variantes del proceso conocido como cogeneración de electricidad.

El objetivo principal del presente trabajo de investigación es la sistematización del sistema de distribución de vapor en una planta de producción de aceite de palma, en la cual la producción se ha incrementado de tal forma que ha requerido la instalación de una caldera adicional, para suplir la demanda de vapor.

Debido a esta situación, resulta un excedente de vapor de hasta 5400 kg/h a una presión superior a la que la planta requiere, lo cual hace posible instalar una turbina de vapor para generar electricidad. El proceso de cogeneración tendría un beneficio para la planta al reducir los costos por consumo de energía eléctrica de fuentes externas.

Con estas condiciones surge la necesidad de rediseñar el sistema de distribución de vapor para soportar la presión requerida en la cogeneración y, a la vez, mantener el flujo continuo y suficiente de vapor hacia el proceso producción de aceite. Para esto, deben especificarse las características de tuberías, válvulas y accesorios, de manera que soporten las condiciones de presión y temperatura de ambos procesos.

Para ello, se cuenta con la autorización de la Gerencia de proyectos de la empresa, de manera que se tiene la factibilidad necesaria para la evaluación del sistema de distribución de vapor, así como el acceso a los datos termodinámicos y de operación de la planta de producción. También se cuenta con los recursos económicos y físicos del investigador para la generación de los cálculos y el informe correspondiente.

La metodología de desarrollo de la investigación y planteamiento de solución se fundamentará en los principios de reingeniería, para obtener un diseño que permita aprovechar la capacidad plena de la caldera, con la flexibilidad necesaria para adecuar los flujos de vapor a las necesidades energéticas de los procesos productivos, sin afectar la presión en los puntos críticos.

Así mismo, con la reconfiguración en el diseño del sistema de distribución de vapor se pretende obtener beneficios como: un mejor costo de operación de la caldera, menor dependencia del suministro eléctrico externo y mejores condiciones operativas que generen una mayor eficiencia del proceso productivo.

El proceso de evaluación, diseño y elaboración del reporte correspondiente abarcará el período entre los meses de julio y octubre de 2023;

dicho reporte contará con una serie de capítulos, como se describe a continuación:

En el primer capítulo, se expondrá el marco teórico relevante para la investigación, que incluye lo relativo a los tipos de vapor y su importancia en los procesos de producción de aceite de palma y cogeneración eléctrica. Además, se plantearán las bases y principios de la metodología para el desarrollo del diseño del sistema de distribución de vapor, para cumplir con los objetivos de la investigación.

En el segundo capítulo se expondrán los cálculos y bases de diseño del sistema de tuberías y accesorios requerido para la sistematización y optimización del flujo de vapor, con atención a sus características y propiedades termodinámicas, para lograr una configuración que permita su adecuada distribución, en función de los requerimientos de flujo variable hacia el proceso productivo y de cogeneración.

Posteriormente, en el capítulo tres, se presentarán los resultados obtenidos y se planteará la opción de diseño que se considera más adecuada para cumplir con los objetivos y necesidades de la planta.

2. ANTECEDENTES

El proceso de cogeneración eléctrica es utilizado desde hace mucho tiempo por un gran número de industrias alrededor del mundo, razón por la que existen variados estudios, documentos y referencias muy detalladas acerca de las opciones y criterios para diseñar un sistema eficiente.

No hay una única forma de cogenerar electricidad como actividad paralela en la industria, ya que puede hacerse a partir de la energía producida por motores, hornos, calderas y cualquier otro equipo industrial que permita el aprovechamiento de energía térmica y su transformación en energía cinética, primero, y luego en energía eléctrica. También puede generarse electricidad a partir de turbinas de gas o motores de combustión interna, por el aprovechamiento del ciclo de Carnot. (Aldana Méndez, 2019)

El proceso de cogeneración, que utiliza el vapor producido por una caldera, es quizás el más usado por la agroindustria, dado que todos los procesos agroindustriales producen biomasa, definida por Verdezoto, Parco, Jácome, Katan & Mora (2021) como “un tipo de energía renovable en la que se emplea materia orgánica que, a su vez, es originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado” (p. 15).

Aldana (2019) considera que “biomasa es todo material de origen biológico producido por los vegetales a través de la captación del CO₂ atmosférico y agua, mediante el proceso de fotosíntesis” (p. 22), y detalla las características y los parámetros que deben considerarse cuando se utiliza como combustible para procesos de cogeneración.

El caso más notorio de aprovechamiento de biomasa ocurre en la industria que inició el uso de este tipo de combustible para operación de calderas: la agroindustria azucarera. Es considerada un ejemplo a seguir por la eficiencia que ha alcanzado en el aprovechamiento de la biomasa como combustible, siendo “uno de los cultivos con mayor capacidad de convertir la energía solar en biomasa” (Verdezoto et al., 2021, p.12), y cuyas referencias se utilizarán para analizar las condiciones de cogeneración más eficientes, independientemente del tipo de biomasa utilizado.

Del trabajo de investigación de Yañez, Ponce, Silva & Castillo (2008) se obtiene valiosa información respecto a la cogeneración en la industria de producción de aceite de palma. Específicamente, el trabajo mencionado hace referencia a los distintos tipos de biomasa generada en el proceso de producción de aceite de palma y, más importante aún, identifica puntualmente los parámetros requeridos para el vapor de proceso y para cogeneración.

Aunque los parámetros identificados en dicho trabajo no coinciden exactamente con los de la operación en la que se lleva a cabo la presente investigación, permiten hacer una relación directa para establecer comparaciones válidas y establecer las condiciones de operación adecuadas.

Así mismo, del trabajo investigativo de Vargas, Yañez, García, Meneses y Cuellar (2011) se obtienen varias referencias respecto al proceso de producción de aceite de palma y los parámetros del vapor utilizado en él, que serán útiles al definir la cantidad y condiciones del vapor que debe destinarse a los procesos de intercambio de calor en la planta objeto de esta investigación.

El trabajo de Muñoz (2015), en cambio, servirá de guía para establecer la metodología de diseño del sistema de aprovechamiento del vapor para

cogeneración, así como para definir los factores a considerar, ya que hace un análisis exhaustivo de un sistema similar que involucra la capacidad de producción de la caldera, la utilización de biomasa y las condiciones de este proceso.

Como se verá en el curso de la investigación, los parámetros de presión con los que opera la caldera que se analiza no corresponden a los establecidos por los trabajos referenciales, pues opera a una presión más baja y sin proceso de sobrecalentamiento. Sin embargo, según el trabajo de Hernández, Lara & Hernández (2020), es posible cogenerar electricidad utilizando vapor a presiones reducidas, toda vez se cuente con una turbina que opere bajo esas condiciones.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Sistema de distribución inadecuado para el uso de vapor con alta presión, que impide el aprovechamiento del excedente de vapor para cogeneración eléctrica en una planta productora de aceite de palma.

3.1. Descripción del problema

El problema que se plantea resolver en el presente trabajo de investigación se centra en la revisión y rediseño del sistema de distribución de vapor, en una planta productora de aceite de palma que instaló una caldera adicional con capacidad para producir 12,000 kg/h de vapor @ 300 PSIG. Esto representa un excedente de hasta 5,400 kg/h de vapor en relación con la demanda del proceso productivo, lo que se suma a la capacidad instalada de 11,300 kg/h para dar un excedente total de hasta 16,700 kg/h de vapor.

Se pretende que el excedente de vapor de alta presión sirva para generar electricidad por medio de una turbina de vapor, lo que implica contar con un sistema de tuberías que soporte la temperatura y presión generadas por la caldera: 216.54 °C @ 300 PSIG.

Además, se requiere mantener un porcentaje de la producción de la caldera como vapor de media presión (175 PSIG) para los procesos de planta. Para ello debe establecerse el porcentaje máximo del caudal que se utilizará para producir electricidad, sin comprometer el suministro de vapor de proceso y rediseñar el sistema de tuberías y accesorios en la línea de descarga de la caldera, para que soporte la presión y temperatura requeridos para cogenerar,

separando luego el caudal de vapor de proceso y reduciendo su presión a la requerida por la planta.

El diseño propuesto debe incluir la posibilidad de ampliar o reducir, a voluntad, el flujo en ambas líneas de vapor, en función de los requerimientos de planta, para mantener la prioridad del suministro de vapor al proceso sobre la operación de cogeneración.

3.2. Descripción del problema

A continuación, en los siguientes incisos se describen las preguntas necesarias para el desarrollo de la investigación.

3.2.1. Pregunta central

¿Cuál es el mejor diseño para el aprovechamiento del excedente de vapor producido por una caldera acuotubular, en una planta productora de aceite de palma que desea utilizarlo para cogeneración eléctrica de autoconsumo?

3.2.2. Preguntas auxiliares

- ¿Cuáles son los requisitos y características que debe tener un sistema de cogeneración con vapor?
- ¿Qué aspectos del diseño del sistema original deben cambiarse para poder cogenerar electricidad y abastecer vapor para el proceso de producción?

- ¿Cuál es la capacidad máxima de cogeneración con el diseño propuesto?

3.3. Delimitación del problema

Para que la investigación sea de impacto significativo, es necesario delimitar los alcances.

3.3.1. Límite temporal

El análisis del problema planteado, así como la formulación de las soluciones de diseño requeridas, se efectuará en el lapso comprendido entre la fecha de inicio del curso de Seminario I y el final de Seminario III: de mayo de 2022 a octubre 2023.

3.3.2. Límite geográfico

Se plantea llevar a cabo la investigación, cálculos y rediseño de los sistemas afectados dentro del límite territorial de los departamentos de Guatemala y Escuintla, en la República de Guatemala.

3.3.3. Límite espacial

Los procesos sujetos a investigación y análisis son parte del área de producción de una industria de aceite de palma, circunscribiéndose las secciones de producción y distribución de vapor.

3.3.4. Límite institucional

La investigación se llevará a cabo en una empresa dedicada al cultivo y procesamiento del fruto de palma africana, para la producción de aceite vegetal. Este proceso también genera fibra vegetal, la cual es utilizada como combustible para generación de vapor y será parte de los procesos analizados.

3.4. Viabilidad de la investigación

Toda vez el problema central ha sido identificado y establecidos los requerimientos y condiciones para la solución de este, mediante el rediseño de los sistemas involucrados, se ha solicitado la anuencia de la Gerencia de ingeniería de la empresa en cuestión, para la realización de la investigación y trabajo de campo necesarios para su desarrollo.

Ante esta solicitud, se ha recibido la autorización de la empresa para realizar la investigación, otorgó acceso irrestricto a toda la información y datos requeridos para llevarla a cabo. A la vez, se ha establecido la disponibilidad de recursos económicos y temporales por parte del investigador, para conducir el trabajo de análisis y planteamiento de soluciones, con lo cual se ratifica la viabilidad para llevarlo a cabo.

3.5. Consecuencias de realizar la investigación

Al realizar la investigación planteada y el análisis de los sistemas y procesos involucrados, se identifican ventajas y desventajas de la solución que se genere.

Las ventajas que se obtendrían incluyen:

- Incremento en la eficiencia de generación de vapor.
- Mejora en la disponibilidad y calidad del vapor para los procesos de planta.
- Aprovechamiento del excedente de vapor generado, utilizándolo para generar electricidad y se reduce el consumo y la dependencia del suministro eléctrico externo.

De no realizarse la investigación, se mantendrían las condiciones actuales de generación de vapor, con las ineficiencias propias por no utilizar la totalidad de la capacidad instalada; además, se mantendría la dependencia total de la red eléctrica nacional.

4. JUSTIFICACIÓN

El trabajo planteado se justifica al estar enmarcado dentro de la línea de investigación de operaciones, específicamente aplicada al diseño e implementación de proyectos industriales. También encuadra en la optimización de operaciones y procesos, debido a que se busca realizar el diseño de un sistema que permita el máximo aprovechamiento de la capacidad de producción instalada y de los recursos energéticos disponibles.

La necesidad de ejecutar esta investigación se debe a la importancia que representa para la empresa la reducción de costos operativos, mediante la optimización del proceso de generación de vapor, así como el aprovechamiento de las características que lo hacen adecuado para producir electricidad.

Dicha importancia radica en los beneficios económicos al incrementar la productividad de la caldera por el uso de la capacidad ociosa para generar electricidad de autoconsumo; reduciendo su dependencia de fuentes externas, lo cual es motivación suficiente para realizar esta investigación.

Los beneficiarios de la implementación de los cambios propuestos en el presente trabajo serán:

- El área de producción de la empresa, al tener un suministro constante de vapor a presión estable.
- El área financiera, al percibir los posibles ahorros en costos de electricidad por la reducción del consumo de suministro externo.

5. OBJETIVOS

5.1. General

Determinar el diseño óptimo del sistema de distribución de vapor, para poder cogenerar electricidad y abastecer vapor al proceso productivo de aceite de palma.

5.2. Específicos

- Establecer si las condiciones e infraestructura con las que opera el sistema de distribución de vapor permiten cogenerar electricidad.
- Identificar los cambios que deben hacerse en la infraestructura, para aprovechar la capacidad de cogeneración eléctrica, manteniendo el flujo de vapor hacia el proceso productivo.
- Determinar cuánta electricidad puede producirse con el diseño propuesto.

6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN

El objetivo de este trabajo de investigación es rediseñar el sistema de distribución de vapor en una planta productora de aceite de palma, de manera que permita producir electricidad por medio de una turbina de vapor.

El esquema de solución implica evaluar la configuración y características operativas del sistema de distribución que posee la planta para el vapor de proceso. Establecer las características que debe tener para soportar las condiciones termodinámicas del vapor para cogeneración, así como definir el diseño del tramo a modificar para el aprovechamiento de ese vapor. Esto incluye las normas y características de los materiales y accesorios del sistema de vapor para cogeneración.

6.1. Etapas de la investigación

La investigación se llevará a cabo siguiendo las fases que se detallan en los siguientes subtítulos.

6.1.1. Fase uno: revisión documental

En la primera etapa del trabajo de investigación, con duración estimada de tres semanas, se harán visitas de campo en la planta para verificar:

- Las condiciones de presión y temperatura requeridas en el proceso de producción.

- La capacidad y condiciones de generación de vapor de la nueva caldera.
- Las características del sistema de tuberías para la distribución de vapor.

También se sostendrán entrevistas con el gerente de mantenimiento y proyectos de la planta, para establecer:

- Los requerimientos de vapor del sistema de cogeneración.
- Las características de la turbina de vapor.
- Las expectativas de cogeneración de electricidad.
- Los tipos de combustible utilizados en la caldera.
- La cantidad de combustible, por tipo, utilizada y su rendimiento en relación con la producción de vapor.
- Las características energéticas de cada tipo de combustible.

6.1.2. Fase dos: diagnóstico

De las semanas cuatro a seis, se utilizarán los datos recolectados para definir las características que debería tener de flujo, en el sistema de tuberías que llevarán el vapor hacia el proceso de cogeneración. Se establecerán los diámetros de tubería adecuados, así como los dispositivos de distribución y control, las normas y materiales que deberían considerarse para los accesorios de esa línea.

6.1.3. Fase tres: definición de estrategia

De las semanas siete a trece, se analizará la información recopilada en campo y el resultado de los cálculos, para definir las bases y la estrategia de diseño, que permita cumplir con los objetivos planteados. También se trasladará

toda la información de cálculos y análisis al diseño gráfico del sistema de distribución por medio de un diagrama de instrumentación y tuberías (P&ID).

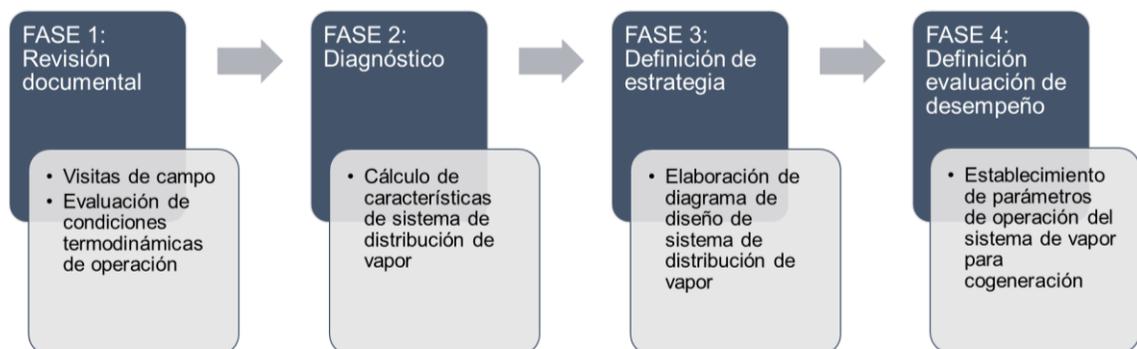
6.1.4. Fase cuatro: definición de evaluación del desempeño

En las últimas dos semanas se establecerán las condiciones termodinámicas que deberán mantenerse en el sistema de distribución para obtener el resultado deseado, tanto en el sistema de cogeneración como en los procesos de producción.

6.2. Esquema de solución

En la figura 1 se presenta el esquema de solución de la investigación.

Figura 1. Fases de la investigación



Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Power Point.

7. MARCO TEÓRICO

7.1. Vapor para procesos industriales

Un elevado porcentaje de industrias productivas tienen en su operación una o más etapas que requieren la adición de energía en forma de calor al proceso.

La forma más común de obtener ese calor en los procesos es utilizando vapor, debido a su “capacidad de transportar energía entre dos puntos en forma de entalpía” (Junta de Castilla y León, 2010, p. 8), y también debido a que el agua es un recurso de bajo costo.

Otra ventaja es que el ciclo de evaporación-condensación es reversible y puede ser ejecutado de forma indefinida con muy pocas pérdidas, además de lo resaltado por Nordelo y González (2010) respecto a las propiedades que hacen idóneo el vapor de agua, dentro de las que se puede mencionar:

- “Alto calor específico
- Alto calor latente
- Alta temperatura de saturación con presiones relativamente bajas
- Bajo consumo de potencia de bombeo
- No es tóxica, ni inflamable, ni corrosiva” (p. 4).

Además de ser utilizado para transferencia térmica, el vapor puede también generar energía mecánica que, a su vez, puede ser transformada en energía eléctrica, utilizando una turbina de vapor. Este es el esquema utilizado

por los sistemas de cogeneración, y una de sus modalidades es la producción de vapor de media o alta presión para generar electricidad, lo que reduce su presión al punto de saturación para luego ser utilizado en procesos de intercambio energético. (Nordelo, 2010)

7.1.1. Definición y propiedades del vapor para procesos industriales

El vapor es la fase gaseosa de cualquier sustancia y, en el caso del agua, tiene características muy particulares que lo hacen ideal para los procesos de transferencia de calor, así como para la generación de energía mecánica que puede ser utilizada en diversos procesos.

Como define Junta de Castilla y León (2010):

El vapor se produce, a partir de agua, en un generador o caldera en el que aumenta su entalpía a costa habitualmente del calor de combustión de un combustible, y una vez en el punto de utilización pierde esta entalpía cediéndola o bien hacia el medio a calefactar, o bien mediante transformación en energía mecánica como por ejemplo en una turbina. (p. 8)

7.1.1.1. Características del vapor

Al referirnos al vapor en la industria debe considerarse que, en realidad, se hace referencia a un sistema bifásico, pues en las tuberías de distribución de vapor coexisten la fase líquida y gaseosa debido a que, una vez el vapor sale del generador o caldera, este empieza a ceder energía hacia los componentes

del sistema de distribución y, por ende, al ambiente circundante, lo que provoca la condensación del vapor y la aparición de la fase líquida en el sistema.

Junta de Castilla y León (2010) indican que:

Cuando el vapor está a la temperatura de ebullición se trata de vapor saturado, pero cuando se encuentra por encima del punto de ebullición se trata de vapor sobrecalentado. Además, en la situación de vapor saturado todavía hay que afinar más, si se tiene en cuenta que esta situación se presenta en un margen muy estrecho y por lo tanto puede cursar, y de hecho lo hace, con mezcla de vapor y agua en distintas proporciones, por lo que un vapor saturado puede ser seco o húmedo con distintos grados de humedad, que vienen definidos por un parámetro que se denomina título del vapor y que representa el porcentaje de fase vapor frente a la mezcla vapor-agua. (p. 9)

De esa cuenta, para establecer las características de un sistema de distribución deben tenerse en cuenta múltiples factores, a fin de considerar las pérdidas energéticas en su recorrido. Se debe evitar que estas provoquen la pérdida de calidad del vapor saturado y, por consiguiente, una reducción en la cantidad de entalpía disponible para los procesos en los que se requiere.

En estado de equilibrio, las variables termodinámicas del vapor son variables de estado, lo que implica que el valor de una sola de ellas define el del resto. De esa cuenta, las propiedades del vapor saturado quedan definidas al establecer su presión o su temperatura y a ese punto correspondería un único valor de entalpía.

Esto permite controlar la temperatura del vapor y su carga energética mediante la regulación de la presión del sistema, haciendo posible el control certero de la transferencia de calor en los procesos.

7.1.2. Sistemas de distribución de vapor

Para que el vapor pueda transmitir su entalpía al condensarse o pueda ser utilizado para generar trabajo en una turbina y cogenerar electricidad; se requiere trasladarlo hasta el punto del proceso en el que se requieren ese calor y trabajo.

Una de las principales propiedades de cualquier gas o vapor es que puede ser fácilmente impulsado dentro de un sistema de tuberías, ya que la presión se transmite con mucha facilidad al generar su desplazamiento sin mayores complicaciones.

Sin embargo, deben considerarse los parámetros de presión y temperatura del vapor, para poder diseñar e instalar adecuadamente el sistema de tuberías, así como seleccionar correctamente sus accesorios, evitando así daños en las tuberías, pérdidas innecesarias de calor o fallas en los accesorios y dispositivos.

7.1.2.1. Tipos de vapor

Según Junta de Castilla y León (2010):

Lo primero que es preciso comprender a la hora de enfrentarse a una instalación de vapor son los diferentes estados que puede presentar el

agua confinada en una red de generación y distribución de vapor, así como las características que definen a cada uno de estos estados.

Inicialmente se pueden definir dos estados básicos:

- Líquido
- Vapor

Estas dos definiciones no son suficientes para estudiar el comportamiento del agua, sino que hay que ahondar más en cada una de ellas. (p. 8)

Junta de Castilla y León (2010) también establecen que:

El estado líquido se puede subdividir en dos situaciones; de esta manera, cuando el líquido se encuentra por debajo del punto de ebullición se habla de líquido subenfriado, y cuando se encuentra en el punto de ebullición se habla de líquido saturado.

A su vez, el estado vapor puede subdividirse en dos situaciones; de esta manera, cuando el vapor está en una temperatura de ebullición, se trata de vapor saturado, y cuando se encuentra por encima del punto de ebullición se trata de vapor sobrecalentado. (p. 9)

Además, en la situación de vapor saturado todavía hay que afinar más, si se tiene en cuenta que esta situación se presenta en un margen muy estrecho y por lo tanto puede cursar, y de hecho lo hace, con mezcla de vapor y agua en distintas proporciones. Un vapor saturado puede ser seco o húmedo, con distintos grados de humedad que vienen definidos por un parámetro que se

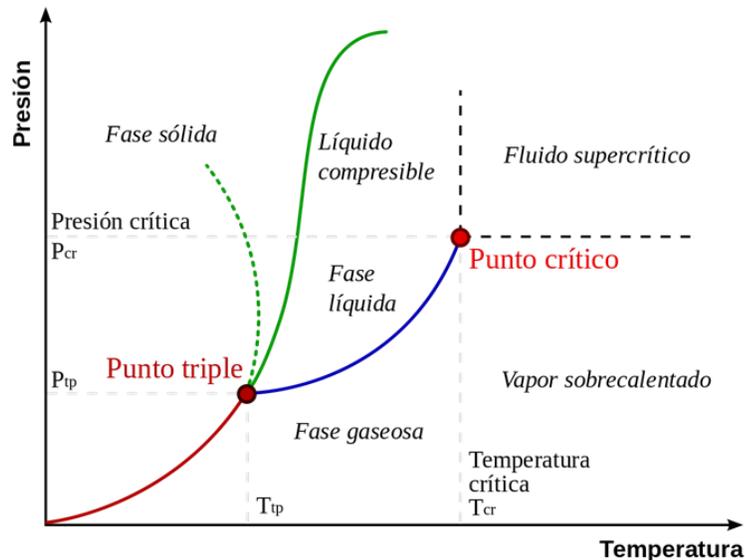
denomina título del vapor, y que representa el porcentaje de fase vapor frente a la mezcla vapor-agua.

Junta de Castilla y León (2010) también indican que:

En el sistema agua-vapor de agua aparecen todos estos estados, en los distintos puntos que constituyen los elementos de la red de generación y distribución de vapor. La situación puntual existente en cada momento depende de las condiciones de presión y temperatura a las que esté sometido. (p. 9)

En el siguiente diagrama se pueden observar las distintas zonas del sistema agua-vapor, en función de la presión (P) y temperatura (T) del sistema:

Figura 2. Diagrama P-T para el agua



Fuente: Wikipedia (2022). *Diagrama de Fase*. Consultado el 4 de noviembre de 2022.

Recuperado de https://es.wikipedia.org/wiki/Diagrama_de_fase.

Para fines de esta investigación, se describirán los dos tipos de vapor que intervienen en los procesos que se analizarán:

7.1.2.2. Vapor saturado

Este vapor es el que se genera cuando el agua alcanza su punto de ebullición, a una presión determinada.

En este punto de ebullición, se ha adicionado suficiente energía para que el agua pase del estado líquido al gaseoso y, mientras se mantenga ese estado energético, las moléculas de agua se mantendrán como vapor.

Sin embargo, en la práctica y una vez se deja de agregar energía o el vapor abandona el recipiente en el que se encontraba contenido en forma líquida, empieza a ceder energía al ambiente o a las paredes del recipiente que lo contiene, en este caso: tuberías y accesorios de conducción del sistema de vapor.

Al ceder su energía se revierte el proceso y el agua regresa al estado líquido de forma paulatina, generando así un sistema bifásico en que coexisten, en distintas proporciones, el estado líquido y gaseoso hasta que, si no se adiciona más energía, todo el sistema pasa de nuevo al estado líquido.

El punto en el que toda la masa de agua se encuentra en estado gaseoso se conoce como vapor saturado seco, mientras que el punto en que toda la masa de agua ha retornado al estado líquido se conoce como líquido saturado.

Entre estos dos puntos se tiene siempre un sistema en que coexisten las dos fases y, para fines de los procesos de transferencia de energía, se reconocen calidades de vapor, atendiendo a la cantidad de agua en fase líquida que se encuentre presente.

De esa cuenta, un sistema en que toda el agua está en estado gaseoso, se dice que tiene calidad 1.0 o 100 %, mientras que un sistema con 10 % de masa de agua en estado líquido, tendrá una calidad de 0.9 o 90 %.

Mientras más alta sea la calidad del vapor más energía podrá transferir al proceso que lo requiera. Esta es la razón por la que se deben evitar al máximo las pérdidas energéticas en los sistemas de conducción de vapor, de manera que toda la energía posible sea llevada hacia los puntos en que se necesita que sea utilizada.

7.1.2.3. Vapor sobrecalentado

Existen aplicaciones del vapor en que no se requiere que aporte energía al proceso, sino que transforme su energía térmica en energía cinética, provocando el movimiento de una turbina que, al estar unida a un generador, entregue energía eléctrica, como es el caso del proceso de cogeneración con turbinas de vapor.

Dado que hay una transformación de energía térmica en cinética, el vapor tenderá igualmente a condensarse, generando una fase líquida en el sistema, lo cual es indeseable cuando se trata de partes metálicas móviles. La presencia de agua genera el fenómeno conocido como golpe de ariete y provocaría corrosión en las partes metálicas.

Es necesario, entonces, sobrepasar el punto de saturación lo suficiente para que la pérdida de energía no provoque condensación en el sistema, lo cual se logra llevando el vapor a la zona de sobresaturación o sobrecalentamiento, lo más lejos posible de la curva de saturación.

7.1.3. Componentes de los sistemas de distribución

Para que el vapor pueda transferir su carga energética o transformarla en energía cinética, es necesario llevarlo hasta los puntos del proceso en que se necesiten.

Como indican Junta de Castilla y León (2010):

El empleo del vapor como fluido térmico lleva implícito un esquema básico consistente en un punto de generación, un punto de utilización y entre ellos debe disponerse de una red de tuberías que los enlazan y son el medio de transporte de un punto al otro. (p. 8)

En relación con esto, Nordelo y González (2007) plantean los componentes propios de un sistema de vapor.

Componentes de un sistema de vapor:

- Generador de vapor (caldera) y sus auxiliares
- Tuberías de vapor
- Válvulas de regulación
- Equipos consumidores
 - Motores primarios: máquinas de vapor, turbinas
 - Equipos de proceso: intercambiadores, evaporadores, secadores, reactores

- Trampas de vapor, sellos barométricos, controles de nivel
- Sistema de condensado: tuberías, tanques, bombas
- Sistema de agua de alimentación: tanques, bomba, calentadores
- Sistema de tratamiento de agua
- Instrumentación y sistemas de control.

Considerando el alcance del trabajo de investigación, nos concentraremos únicamente en dos de los componentes del sistema: la caldera y la red de tuberías para distribución de vapor.

7.1.3.1. Generador de vapor o caldera

Existen múltiples tipos de calderas, pero hay que atender diversos factores como configuración general, tamaño, la distribución del agua y el combustible y su uso, entre otros factores.

Todas las calderas son básicamente intercambiadores de calor de concha y tubos, en las que los gases de combustión transfieren energía al agua, provocando su cambio de estado de líquido a vapor. Sin embargo, algunas hacen ese cambio de fase manteniendo el sistema en el equilibrio líquido-vapor, generando así vapor saturado, mientras que otras lo hacen llevando el vapor a presiones y temperaturas por encima de la curva de saturación, entregando vapor sobrecalentado.

La característica principal de las calderas pirotubulares es que los gases de combustión se encuentran en los tubos del intercambiador y el agua en la concha, por lo que se denominan pirotubulares y entregan vapor en condiciones de saturación.

Las acuotubulares, en cambio, conducen el agua dentro de los tubos y estos se encuentran dentro de la cámara de combustión, que suele ser un horno, procurando así las condiciones para generar un vapor de alta presión. Estas son las denominadas calderas acuotubulares. (Nordelo y González, 2007)

7.1.3.2. Red de tuberías y accesorios

Las tuberías son el componente del sistema que permite que el vapor sea trasladado del punto de generación hacia los usuarios o procesos en que se requiere su acción.

Como interpretan Junta de Castilla y León (2010):

Una red de distribución de vapor, en principio está compuesta, al igual que cualquier red de distribución de un fluido, por tuberías y accesorios de tubería. Sin embargo, los cambios de fase en los que se basa el empleo de este tipo de redes hacen necesario el empleo de determinados elementos que son muy específicos de este tipo de sistemas. (p. 14)

Dependiendo de las características termodinámicas del sistema, específicamente la presión y temperatura de operación, así serán las características de las tuberías y accesorios que deban utilizarse para el sistema de distribución. Todos deben ser capaces de soportar condiciones de presión y temperatura, por lo que deberán ser seleccionados adecuadamente para evitar fallas y pérdidas en el proceso.

7.1.4. Consideraciones de diseño

De acuerdo con Echeverry (1995):

Para seleccionar el diámetro de las tuberías que van a conducir vapor es importante tener en cuenta los siguientes elementos:

- Flujo de vapor
- Longitud total del tramo
- Condiciones del vapor (presión, temperatura y calidad).

Para seleccionar el diámetro de una tubería de conducción de vapor se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Para grandes longitudes se deberá buscar una mínima caída de presión por metro, aumentando en lo posible la presión del vapor a conducir para poder, de esta forma, usar un menor diámetro. Así se logra con la menor inversión un buen montaje en el aspecto técnico.
- Para distancias cortas, la caída de presión por metro admitida podrá ser mayor, transportando el vapor a una menor presión o usando un diámetro menor de tubería. (p. 139)

De cualquier forma, para lograr el uso de un diámetro de tubería menor para una masa de vapor determinada, con una caída de vapor autorizada se deberá:

- Transportar el vapor a la mayor presión permisible.
- Usar la ruta técnicamente más corta con la menor cantidad de accesorios.
- Para líneas de conducción principales se deben buscar diámetros de tubería en los cuales la velocidad del vapor oscile entre 6000 y 12 000 pies/minuto. (Echeverry, 1995)

Así mismo, de acuerdo con Junta de Castilla y León (2010):

Cuando se selecciona la presión de trabajo, se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Presión requerida en el punto de utilización.
- Caída de presión a lo largo de la tubería.
- Pérdidas de calor en la tubería.

Sobredimensionar las tuberías significa que:

- Las tuberías serán más caras de lo necesario.
- Se formará un mayor volumen de condensado a causa de las mayores pérdidas de calor.
- La calidad de vapor y posterior entrega de calor será más pobre, debido al mayor volumen de condensado que se forma.
- Los costes de instalación serán mayores.
- Subdimensionar las tuberías significa que:
- La velocidad del vapor y la caída de presión serán mayores, generando una presión inferior a la que se requiere en el punto de utilización.
- El volumen de vapor será insuficiente en el punto de utilización.

- Habrá un mayor riesgo de erosión, golpe de ariete y ruidos a causa del aumento de velocidad. (p. 23)

En la tabla I se muestran estándares aceptados para el flujo de vapor saturado en tuberías.

Tabla I. **Velocidad aceptada para flujo de vapor saturado en tuberías**

Presión bar	Velocidad		kg/h										
	m/s		15mm	20mm	25mm	32mm	40mm	50mm	65mm	80mm	100mm	125mm	150mm
0,4	15	7	14	24	37	52	99	145	213	394	648	917	
	25	10	25	40	62	92	162	265	384	675	972	1 457	
	40	17	35	64	102	142	265	403	576	1 037	1 670	2 303	
0,7	15	7	16	25	40	59	109	166	250	431	680	1 006	
	25	12	25	45	72	100	182	287	430	716	1 145	1 575	
	40	18	37	68	106	167	298	428	630	1 108	1 712	2 417	
1,0	15	8	17	29	43	65	112	182	260	470	694	1 020	
	25	12	26	48	72	100	193	300	445	730	1 160	1 660	
	40	19	39	71	112	172	311	465	640	1 150	1 800	2 500	
2,0	15	12	25	45	70	100	182	280	410	715	1 125	1 580	
	25	19	43	70	112	162	295	428	656	1 215	1 755	2 520	
	40	30	64	115	178	275	475	745	1 010	1 895	2 925	4 175	
3,0	15	16	37	60	93	127	245	385	535	925	1 505	2 040	
	25	26	56	100	152	225	425	632	910	1 580	2 480	3 440	
	40	41	87	157	250	375	595	1 025	1 460	2 540	4 050	5 940	
4,0	15	19	42	70	108	156	281	432	635	1 166	1 685	2 460	
	25	30	63	115	180	270	450	742	1 080	1 980	2 925	4 225	
	40	49	116	197	295	456	796	1 247	1 825	3 120	4 940	7 050	
5,0	15	22	49	87	128	187	352	526	770	1 295	2 105	2 835	
	25	36	81	135	211	308	548	885	1 265	2 110	3 540	5 150	
	40	59	131	225	338	495	855	1 350	1 890	3 510	5 400	7 870	
6,0	15	26	59	105	153	225	425	632	925	1 555	2 525	3 400	
	25	43	97	162	253	370	658	1 065	1 520	2 530	4 250	6 175	
	40	71	157	270	405	595	1 025	1 620	2 270	4 210	6 475	9 445	
7,0	15	29	63	110	165	260	445	705	952	1 815	2 765	3 990	
	25	49	114	190	288	450	785	1 205	1 750	3 025	4 815	6 900	
	40	76	177	303	455	690	1 210	1 865	2 520	4 585	7 560	10 880	
8,0	15	32	70	126	190	285	475	800	1 125	1 990	3 025	4 540	
	25	54	122	205	320	465	810	1 260	1 870	3 240	5 220	7 120	
	40	84	192	327	510	730	1 370	2 065	3 120	5 135	8 395	12 470	
10,0	15	41	95	155	250	372	626	1 012	1 465	2 495	3 995	5 860	
	25	66	145	257	405	562	990	1 530	2 205	3 825	6 295	8 995	
	40	104	216	408	615	910	1 635	2 545	3 600	6 230	9 880	14 390	
14,0	15	50	121	205	310	465	810	1 270	1 870	3 220	5 215	7 390	
	25	85	195	331	520	740	1 375	2 080	3 120	5 200	8 500	12 560	
	40	126	305	555	825	1 210	2 195	3 425	4 735	8 510	13 050	18 630	

Fuente: Spirax Sarco (1999). *Distribución de vapor. Guía de referencia técnica.*

De igual forma, según Vega y Rodríguez (2007), la velocidad recomendada para el vapor, según su tipo y condiciones, es la que se muestra en las tablas II y III.

Tabla II. **Velocidad recomendada para los distintos tipos de vapor**

TIPO DE VAPOR	VELOCIDAD (m/s)
Vapor sobrecalentado	40 a 75
Vapor saturado	25 a 35
Vapor de escape	30 a 45
Vapor de los evaporadores	35 a 50
Vapor al vacío	45 a 60

Fuente: Vega y Rodríguez. (2007). *Pérdidas de presión en tuberías de vapor.*

Tabla III. **Velocidad recomendada, según la presión de operación**

PRESIÓN DE VAPOR (kg/cm²)	VELOCIDAD (m/s)
De 1 a 1.5	25 a 30
De 1.5 a 5	30 a 35
De 5 a 10	35 a 40
De 10 a 25	40 a 50
De 25 a 100	50 a 60

Fuente: Vega y Rodríguez. (2007). *Pérdidas de presión en tuberías de vapor.*

7.2. Proceso de producción de aceite de palma

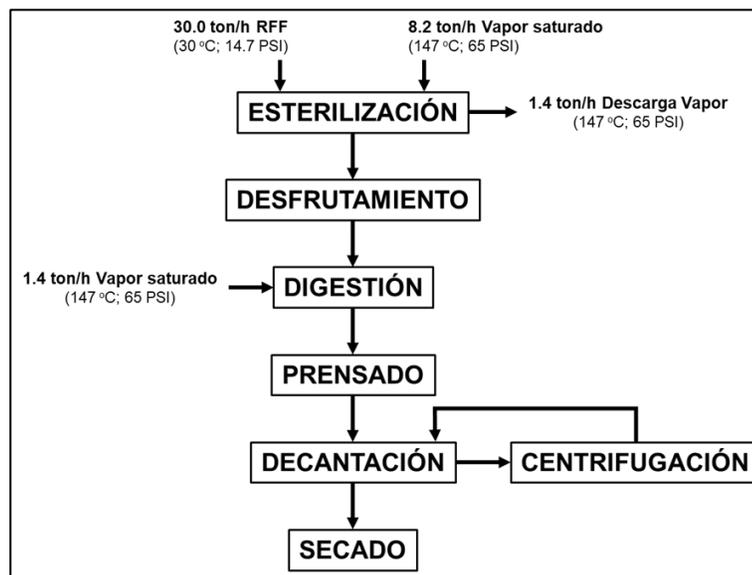
En los siguientes incisos se describe el proceso de producción del aceite de palma.

7.2.1. Generalidades

El aceite de palma es “el producto principal que se deriva a partir de los frutos y las almendras de la palma *elaeis guineensis Jacq*” (Jaimes, Rocha, Vesga, y Kafarov, 2012, p. 62) y su mercado continúa en crecimiento, por lo que cada vez es mayor la demanda y se requiere una mayor optimización de su proceso de producción.

Durante este proceso se requiere el uso de vapor como fuente de calor en todas sus etapas, indicadas a continuación con sus requerimientos energéticos estimados, en relación con una carga de 30.0 TM de Racimo de Fruto Fresco (RFF):

Figura 3. Proceso de extracción de aceite de palma africana



Fuente: Jaimes, Rocha, Kafarov y Vesga. (2012). *Análisis termodinámico del proceso real de extracción de aceite de palma africana.*

7.2.2. Función del vapor en el proceso de producción de aceite de palma

Como se observa en la figura 3, hay dos etapas del proceso que requieren la adición de calor: la esterilización y la digestión.

En la esterilización, los objetivos que se buscan, al agregar calor, son los siguientes:

- Evitar posibles aumentos de los ácidos grasos libres.
- Facilitar la separación mecánica para aflojar la fruta que aún se encuentre pegada al racimo.
- Preparar el mesocarpio para la prensa subsiguiente.
- Acondicionar las nueces para romperlas. (Velayután, 1986)

En la digestión, en cambio, se debe procurar mantener una temperatura constante de 100.0 °C para aflojar el mesocarpio y romper las celdas que contienen el aceite.

La forma de agregar este calor en ambos procesos es con la aplicación de vapor directamente al producto, en las condiciones descritas anteriormente, aunque las condiciones pueden variar de una planta de producción a otra.

7.3. Proceso de cogeneración eléctrica

Cada vez es más común en la industria encontrar procesos secundarios para generar electricidad a partir de vapor, como un paso previo a entregarlo a la parte productiva.

Esto permite, como se verá a continuación, reducir costos operativos y maximizar la eficiencia de las calderas.

7.3.1. Definición y concepción técnica

Para fines prácticos, “el término cogeneración está definido en general como la generación simultánea y combinada de calor y energía eléctrica” (Campos *et al*, s.f., p. 1).

En la mayoría de las industrias, que utilizan vapor de media y alta presión para sus procesos productivos, existe la posibilidad de generar electricidad con ese vapor, como un proceso alterno al principal; de manera que se aprovecha tanto la energía térmica como el trabajo que puede generar el vapor.

De hecho, hay industrias como las del azúcar que han establecido procesos independientes de venta de energía eléctrica a la red nacional, al hacer de la cogeneración uno de sus principales procesos y no únicamente un proceso complementario, para aprovechar la capacidad instalada.

Sin embargo, para poder aprovechar la capacidad de generación de trabajo del vapor deben diseñarse adecuadamente las instalaciones de tuberías y accesorios, de manera que se observen los estándares adecuados para el manejo de las presiones y temperaturas inherentes al proceso de cogeneración eléctrica con vapor.

7.3.2. Cogeneración con turbina de vapor

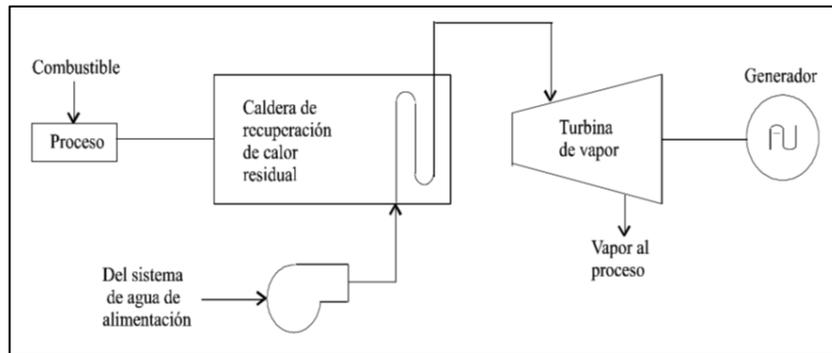
La cogeneración puede darse por distintos métodos, dependiendo del proceso original y la forma en que se genere la electricidad.

El uso de turbinas de vapor es lo más común cuando se utiliza vapor como fuente para la generación de trabajo.

Las turbinas de vapor son máquinas accionadas por un fluido en movimiento; en este caso, el fluido es el vapor, el cual genera movimiento debido a la presión que ejerce sobre la tobera y los alabes. La turbina consta de un rotor con eje, formado por planos de circunferencia que en los bordes contienen los alabes, los cuales impulsan a la rueda que están unidas a un eje principal. La turbina de vapor acciona un generador que produce energía eléctrica. (Lostaunau, 2007, p. 19)

La figura 4 muestra el proceso básico de generación eléctrica, utilizando una turbina de vapor.

Figura 4. **Diagrama sistema de cogeneración con turbina de vapor**



Fuente: Campos *et al.* (s.f.). *Eficiencia energética en la generación y distribución del vapor.*

7.3.3. **Características de los componentes del sistema de distribución de vapor para cogeneración**

Como se mencionó antes, el vapor para los procesos de cogeneración debe encontrarse en la zona de sobrecalentamiento del diagrama de fases del agua, para asegurar que el vapor entregará su carga energética sin que se genere condensación que pueda dañar la turbina.

Para este estudio en particular, la caldera entrega vapor a 300 PSI que, en condiciones de saturación tendría una temperatura de 216.5 °C. Para evitar su condensación, debería sobrecalentársele, al menos a 300 °C.

La práctica usual es utilizar tuberías de acero al carbón bajo la norma ASTM A53/A106, para soportar estas condiciones de presión y temperatura. Los accesorios y válvulas deberían seleccionarse en concordancia, bajo las normas ASTM A234, para accesorios de conexión de tubería y ASTM A216 WCB, para válvulas.

Generalmente los accesorios se clasifican según su resistencia a una presión nominal dada, generando lo que se conoce como clase. De esa cuenta, los accesorios Clase 150 hacen referencia a que soportan una presión nominal aproximada de 150 PSI y, correspondientemente, los accesorios Clase 300 soportarían una presión nominal de 300 PSI.

Sin embargo, en la práctica estos parámetros varían, dependiendo de la temperatura del vapor, por lo que para seleccionar adecuadamente los accesorios debemos referirnos a tablas de los fabricantes, en los que muestran la resistencia de estos bajo distintas condiciones de presión y temperatura.

En la tabla siguiente se muestra la relación presión y temperatura para las válvulas fabricadas con acero bajo norma ASTM A216 WCB.

Tabla IV. **Capacidad de trabajo del acero al carbón**

**RELACIÓN PRESIÓN TEMPERATURA
ACERO AL CARBÓN ASTM A216 GRADO WCB**

TEMPERATURA		MÁXIMA PRESIÓN DE TRABAJO PERMITIDA (PSI _g)					
		CLASE					
°F	°C	150	300	600	900	1500	2500
-20 a 100	-29 a 38	285	740	1480	2220	3705	6170
200	93.3	260	680	1360	2035	3395	5655
300	148.9	230	655	1310	1965	3270	5450
400	204.4	200	635	1265	1900	3170	5280
500	260.0	170	605	1205	1810	3015	5025
600	315.6	140	570	1135	1705	2840	4730
650	343.3	125	550	1100	1650	2745	4575
700	371.1	110	530	1060	1590	2665	4425
750	398.9	98	505	1015	1520	2535	4230
800	426.7	80	410	825	1235	2055	3430
850	454.4	65	320	640	955	1595	2655
900	482.2	50	230	460	690	1150	1915
950	510.0	35	135	275	410	685	1145
1000	537.8	20	85	170	255	430	715

Fuente: Walworth. (2012). *Catálogo válvula bonete bridado fundido.*

Tal como se observa en la tabla III, para una temperatura de vapor de 300 °C los accesorios clase 150 de uso más común no serían recomendables, porque soportarían apenas 140 PSig. Los accesorios clase 300, en cambio, soportarían una presión de 570 PSig, siendo la selección más adecuada para este caso.

7.4. Reingeniería

Se utilizarán principios de reingeniería para el desarrollo de la solución, debido a que se caracteriza como una modificación de diseño al proceso actual de distribución y uso de vapor.

7.4.1. Antecedentes y marco conceptual

Reingeniería es “una herramienta administrativa la cual consiste en estudiar los procesos productivos de organizaciones de cualquier sector, y a través del cual se pueden rediseñar procesos productivos realizando modificaciones en dichos procesos” (Pérez, Gisbert y Pérez, 2017, p. 83).

Este concepto surge a finales de la década de 1980 y se populariza en la década de 1990, de la mano de Michael Hammer y James Champy, al incorporarlo como un modelo que “pretende proporcionar soluciones que permitan a las organizaciones enfrentarse a los retos que exigen los clientes, al obstáculo que representa la competencia y, por último, al riesgo que supone un importante cambio en la empresa” (Escalera, Masa y García, 2008, p. 1).

7.4.2. Aplicación a los procesos industriales

Originalmente, la reingeniería fue planteada como un método para reestructurar profundamente procesos empresariales relacionados con servicio al cliente. Sin embargo, con el pasar del tiempo tomó relevancia también en el campo de los procesos administrativos, comerciales e industriales, por lo que su metodología se ha adaptado a todos estos ámbitos.

Específicamente en la industria, la reingeniería aplica el rediseño de procesos, planteando mejoras o modificaciones profundas o radicales a estos, en busca de una mayor eficiencia productiva, una reducción en los desperdicios, una mejora en los costos o una mejor gestión de los procesos.

7.4.3. Fases de implementación

Todos los autores coinciden en la metodología utilizada para la reingeniería de procesos, la cual está basada en las fases de reingeniería propuestas por Manganeli y Klein:

- Preparación del cambio: consiste en mentalizar al personal que compone la organización sobre la necesidad de cambio para la consecución de los objetivos fijados por la empresa.
- Planeación del cambio: esta fase está basada en el estudio de las diferentes áreas de la empresa, con el objetivo de identificar aquellos procesos y áreas de la empresa en las cuales existe una necesidad urgente de cambio.
- Diseño del cambio: fase en la cual se realiza el rediseño de los procesos productivos que necesitan mejoras urgentes, así como implantación de las modificaciones.

- Evaluación del cambio: consiste en la validación del rediseño o mejora de los procesos durante un periodo de tiempo, en el cual se pueden corregir errores en dichos rediseños o mejoras. (Pérez, Gisbert y Pérez, 2017, p. 88)

8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

OBJETIVOS E HIPÓTESIS

RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO

INTRODUCCIÓN

1. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

1.1. Vapor para procesos industriales

1.1.1. Definición y propiedades del vapor para procesos industriales

1.1.1.1. Características del vapor

1.1.1.2. Condiciones de generación y uso del vapor

1.1.1.2.1. Presión y temperatura

1.1.2. Sistemas de distribución de vapor

1.1.2.1. Tipos de vapor

1.1.2.1.1. Vapor saturado

1.1.2.1.2. Vapor sobrecalentado

1.1.2.2. Componentes de los sistemas de distribución

1.1.2.3. Consideraciones de diseño

- 1.2. Proceso de producción de aceite de palma
 - 1.2.1. Generalidades
 - 1.2.2. Función del vapor en el proceso de producción de aceite de palma
 - 1.2.2.1. Vapor como fuente energética
 - 1.2.2.2. Características del vapor para el proceso
 - 1.2.2.3. Determinación del consumo de vapor
 - 1.3. Cogeneración eléctrica
 - 1.3.1. Definición y concepción técnica
 - 1.3.2. Tipos de cogeneración
 - 1.3.3. Aplicaciones
 - 1.3.4. Cogeneración con turbina de vapor
 - 1.3.4.1. Características del vapor para cogeneración
 - 1.3.4.2. Características de los componentes del sistema de distribución de vapor para cogeneración
 - 1.3.4.2.1. Tuberías y accesorios
 - 1.3.4.2.2. Válvulas
 - 1.4. Reingeniería
 - 1.4.1. Antecedentes y marco conceptual
 - 1.4.2. Aplicación a los procesos industriales
 - 1.4.3. Fases de implementación
-
- 2. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN
 - 3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS
 - 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CONCLUSIONES
RECOMENDACIONES
REFERENCIAS

9. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Atendiendo a las características relativas a las herramientas, al enfoque y a las perspectivas de análisis, el trabajo de investigación descrito en este documento es de enfoque mixto, descriptivo y no experimental; el análisis de los datos es retrospectivo y su recolección es transversal.

9.1. Enfoque

Por tratarse de un estudio para definir las características de diseño de un sistema de distribución de vapor, y al ser necesario medir y realizar cálculos sobre variables termodinámicas relativas al fluido y a los procesos, el enfoque del estudio es principalmente cuantitativo. A la vez, la estructura de la investigación no es necesariamente lineal y secuencial, porque el diseño debe atender condiciones operativas que responden a necesidades cualitativas de los procesos a los que atiende.

Esto hace que el trabajo de investigación tenga un enfoque general mixto, en el que se generará un análisis cuantitativo para definir las características cualitativas de diseño del sistema de distribución de vapor.

9.2. Diseño

La investigación se realizará sobre la recolección retrospectiva de datos de forma no experimental, evaluando las características nominales de operación del sistema de distribución de vapor y los procesos que lo utilizan. Estos datos se utilizarán para realizar los cálculos que permitan establecer los

parámetros de trabajo futuro, así como para definir las características del sistema de tuberías que distribuirá el vapor, para el proceso productivo y el de cogeneración eléctrica.

9.3. Tipo

La investigación se define de tipo mixto porque se hará un análisis histórico de datos, que permitirá definir las condiciones nominales de generación y distribución de vapor, los cuales son de tipo categórico.

9.4. Alcance

Se considera una investigación de carácter descriptivo porque pretende identificar los criterios de diseño del sistema de distribución de vapor, para establecer las características de implementación de este, permitiendo así aprovechar la capacidad instalada de generación de vapor.

9.5. Variables e indicadores

Para los objetivos de esta investigación deben analizarse variables operativas y parámetros conceptuales de diseño, que permitan realizar los cálculos necesarios, para establecer las características del sistema de distribución de vapor.

Las variables se consideran de la siguiente manera:

- Diagnóstico de las condiciones e infraestructura del sistema de distribución de vapor existente.

Esta variable es de tipo cuantitativo y en ella se definirán los parámetros termodinámicos del vapor utilizado en los procesos productivos. Se identificarán las características físicas de los componentes del sistema existente.

Se medirá por medio de los siguientes indicadores:

- Presión del vapor en la línea de distribución
 - Temperatura del vapor en los puntos de entrega
 - Consumo histórico de vapor para producción
- Cambios en la infraestructura para incorporar los componentes que soporten las condiciones del vapor para cogeneración eléctrica.

Esta variable es de tipo cualitativo, que establece las normas, características físicas, distribución y estándares de instalación de las secciones de tubería que se modificarán para soportar el proceso de cogeneración, con base en los parámetros de presión y temperatura de dicho proceso.

- Evaluación de la cantidad de electricidad que puede ser generada con el vapor disponible.

Esta variable es de tipo cuantitativo, la cual define la cantidad de energía eléctrica generada en función de la cantidad de vapor disponible con el diseño y distribución estimados.

Se establecen dos indicadores para esta variable:

- Cantidad de electricidad en KWH, que el sistema puede producir por tonelada de vapor.

- Cantidad de vapor disponible para el proceso de cogeneración.

9.6. Operativización de las variables

De acuerdo con las variables definidas, se muestran en la Tabla V los indicadores y las técnicas de recolección.

Tabla V. **Matriz de variables**

OBJETIVOS ESPECÍFICOS	VARIABLE	TIPO DE VARIABLE	INDICADOR	TÉCNICA DE RECOLECCIÓN
Establecer si las condiciones con las que opera el sistema de distribución de vapor permiten cogenerar electricidad.	1. Presión y temperatura de vapor requeridos en la operación de producción de aceite	Cuantitativas	1. Presión en la línea de vapor del proceso de producción / Temperatura relacionada a la presión medida	Observación / Tabulación de datos / Referencia de tablas de vapor
	2. Presión y temperatura del vapor generado por la caldera			
	3. Presión y temperatura del vapor requerido para cogeneración eléctrica.		2. Condiciones termodinámicas del vapor para cogeneración	Tablas de vapor
	4. Consumo histórico de vapor para producción		Toneladas de vapor producidas para producción de aceite	Datos históricos de planta
Identificar los cambios que deben hacerse en la infraestructura para aprovechar la capacidad de cogeneración eléctrica, manteniendo el flujo de vapor hacia el proceso productivo.	1. Características del sistema de tuberías y accesorios de distribución de vapor	Cualitativa	1. Materiales de fabricación, normas de tuberías y accesorios de las tuberías de distribución de vapor	Observación / Información transmitida por responsables del sistema de vapor
Determinar cuánta electricidad puede producirse con el diseño propuesto	1. Tasa de producción de vapor de la turbina.	Cuantitativa	1. KWH generados por tonelada de vapor	Información de diseño de la turbina
	2. Cantidad de vapor disponible para cogeneración			Tabulación y cálculos

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

9.7. Fases de la investigación

Para completar adecuadamente el análisis y desarrollo de la solución requerida por la empresa, la investigación se llevará a cabo en las fases que a continuación se describen.

9.7.1. Fase uno: revisión documental

En la primera etapa del trabajo de investigación se harán visitas de campo a la planta para verificar:

- Las condiciones de presión y temperatura requeridas en el proceso de producción.
- La capacidad y condiciones de generación de vapor de la nueva caldera.
- Las características del sistema de tuberías para la distribución de vapor.
- También se sostendrán entrevistas con el gerente de mantenimiento y proyectos de la planta, para establecer:
 - Los requerimientos de vapor del sistema de cogeneración.
 - Las características de la turbina de vapor.
 - Las expectativas de cogeneración de electricidad.
 - Los tipos de combustible utilizados en la caldera.
 - La cantidad de combustible, por tipo, utilizada y su rendimiento en relación con la producción de vapor.
 - Las características energéticas de cada tipo de combustible.

Las tareas enumeradas para la primera fase se completarán en las primeras tres semanas de la investigación, al final de las cuales se tabulará toda la información recopilada, para establecer la base de cálculo para el rediseño del sistema de distribución de vapor.

En esas mismas semanas, se harán las consultas bibliográficas para documentar y soportar adecuadamente el proceso de diseño; también se elaborará la memoria de cálculo para mostrar los distintos escenarios de diseño y seleccionar el más adecuado.

9.7.2. Fase dos: diagnóstico

De las semanas cuatro a la seis, se utilizarán los datos recolectados respecto al sistema de generación y distribución de vapor, para realizar los cálculos que permitan comprender condiciones fisicoquímicas y termodinámicas que tiene el sistema de distribución del vapor utilizado en la planta para intercambio de calor.

Dichos cálculos se harán también para definir las características que debería tener de flujo en el sistema de tuberías, que llevarán el vapor hacia el proceso de cogeneración, y establecer los diámetros de tubería adecuados, así como los dispositivos de distribución y control, las normas y materiales que deberían considerarse para los accesorios de esa línea.

9.7.3. Fase tres: definición de estrategia

De la semana siete a la diez, se analizará la información recopilada en campo y el resultado de los cálculos, para definir las bases y la estrategia de diseño que permita cumplir con los objetivos planteados:

- Dirigir el excedente de vapor producido por la nueva caldera hacia el proceso de cogeneración.
- Mantener el flujo prioritario de vapor necesario para los procesos de transferencia de calor en la planta de producción.

- Regular y controlar ambos flujos en función del consumo real de vapor en la planta.

De la semana once a la trece, se trasladará toda la información de cálculos y análisis al diseño gráfico del sistema de distribución, por medio de un diagrama de instrumentación y tuberías.

9.7.4. Fase cuatro: definición de evaluación de desempeño

En las semanas catorce y quince se harán visitas a la planta para presentar el diseño propuesto, verificar la viabilidad de instalación de las derivaciones, en función del espacio disponible para el paso de las tuberías. También se establecerán las condiciones termodinámicas que deberán mantenerse en el sistema de distribución, para obtener el resultado deseado, tanto en el sistema de cogeneración como en los procesos de producción.

9.8. Población y muestra

La población de datos sujetos a análisis estará conformada por los consumos de vapor, en toneladas métricas por hora (TM/h), de los nueve meses anteriores al inicio de esta investigación, proporcionados por la Gerencia de proyectos de la planta.

Empleando la metodología de definición de muestreo estadístico, con un nivel de confianza de 95 % y error del 5 %, se calcula el tamaño de la muestra:

$$n = \frac{N \sigma^2 Z^2}{(N - 1) e^2 + \sigma^2 Z^2}$$

Donde:

- n = tamaño de la muestra
- N = tamaño de la población
- σ = desviación estándar de la población (0.5 por convención)
- Z = tipificación del nivel de confianza de la distribución normal; para este caso: 1.96
- e = error de la muestra (0.05 por convención)

La aplicación de esta fórmula, considerando $N = 9$, da un resultado para n de 8.81, por lo que se considerará el universo total de los datos como muestra representativa, para el análisis estadístico y la generación de una curva que permita la proyección a futuro.

Con esto, se establece la cantidad promedio aproximada de vapor disponible para cogeneración, así como los mínimos y máximos proyectados del consumo de vapor para producción y, por consiguiente, el caudal disponible para cogeneración, en función del régimen de demanda del proceso.

10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

Los datos requeridos para la investigación tienen distintas características y serán analizados de forma distinta.

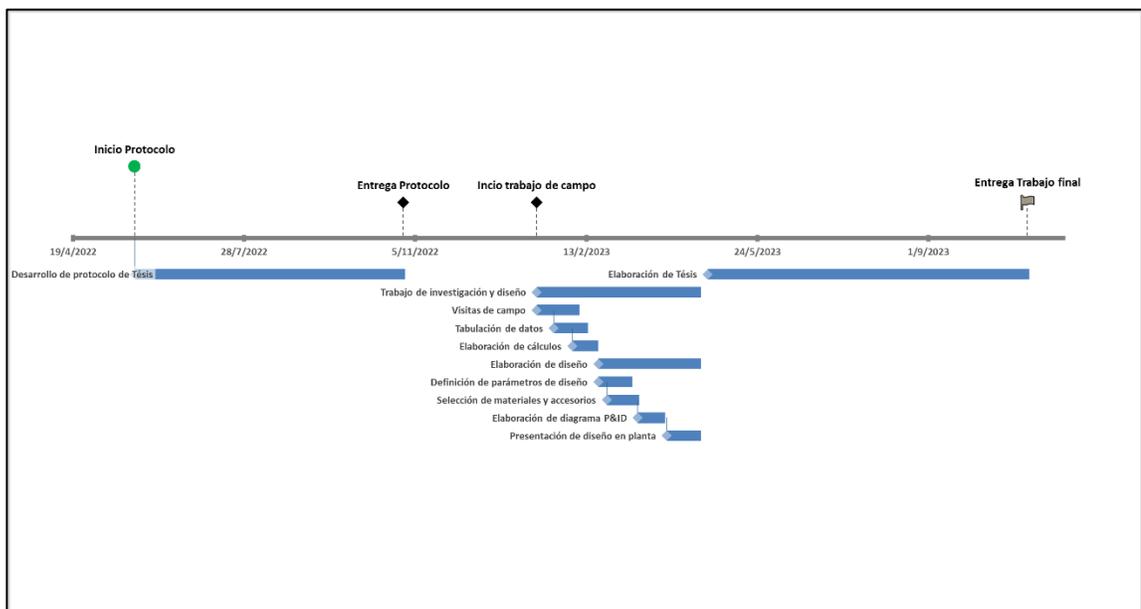
Para el análisis de los datos de producción de vapor y la proporción requerida de este para el proceso de producción de aceite, así como para el caudal disponible para cogeneración, se utilizará la estadística descriptiva, generando promedios de consumo de doce meses anteriores al análisis, y se establecerá la proyección futura del flujo de vapor disponible para cogeneración. Para ello se utilizarán series de tiempo con análisis de desviación estándar de los consumos históricos.

Adicional, se tendrán como variables categóricas evaluadas transversalmente, la presión y temperatura del vapor de proceso y de cogeneración, proporcionando, junto al dato del caudal esperado para cada uno, las especificaciones y parámetros de diseño de las tuberías y accesorios que conformarán el sistema de distribución propuesto.

11. CRONOGRAMA

En la figura 5 se muestra el cronograma general planteado para el desarrollo de las actividades de investigación, diagnóstico, análisis y planteamiento de la solución.

Figura 5. Cronograma de actividades



Fuente: elaboración propia, realizado con Visio.

12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

Tanto el trabajo de campo como el análisis de información, cálculos y diseño del sistema de vapor se harán con recursos propios del estudiante de la maestría, según se enumerarán a continuación, los cuales se consideran suficientes y accesibles, por lo que se concluye que es factible la realización del trabajo de investigación.

12.1. Recursos

En los siguientes incisos se enlistan los recursos necesarios para el desarrollo de la investigación.

12.1.1. Recursos humanos

- Estudiante de maestría en Gestión Industrial
- Asesor de maestría
- Gerente de proyectos de planta productora de aceite
- Supervisor de diseño de planta productora de aceite

12.1.2. Recursos físicos

- Vehículo para transporte
- Computadora personal
- Equipo de medición de temperatura (cámara infrarroja)
- Equipo de protección personal
- Impresora con tinta

- Papel para impresión
- Teléfono celular con línea telefónica fija
- Servicio de internet residencial

12.1.3. Recursos tecnológicos

- TLV ToolBox (calculadora de diseño para sistemas de vapor)
- Microsoft Office 365

12.1.4. Recursos financieros

En la tabla VI se detallan los costos de la investigación.

Tabla VI. **Detalle de costos de los recursos**

Descripción	Cantidad	Costo unitario	Costo total
Recursos humanos			
Honorarios estimados como aporte del estudiante	6	Q 1,000.00	Q 6,000.00
Asesoría de tesis (<i>ad honorem</i>)	1	Q 0.00	Q 0.00
Recursos materiales			
Computadora personal	1	Q 6,500.00	Q 6,500.00
Cámara infrarroja	1	Q 4,500.00	Q 4,500.00
Equipo de protección personal	1	Q 1,750.00	Q 1,750.00
Impresora y tinta	1	Q 2,500.00	Q 2,500.00
Papel para impresión	1	Q 100.00	Q 100.00
Recursos complementarios			
Teléfono celular con línea fija	6	Q 360.00	Q 2,160.00
Servicio de internet residencial	6	Q 500.00	Q 3,000.00
Viáticos de movilización	4	Q 350.00	Q 1,400.00
COSTO TOTAL			Q 27,910.00

Fuente: elaboración propia, hecho con Microsoft Excel.

El financiamiento del trabajo de investigación será soportado totalmente por el estudiante de maestría.

13. REFERENCIAS

1. Aldana, F. (2019). *Evaluación técnica, económica y ambiental de alternativas de autogeneración de electricidad o cogeneración, a partir de biomasa residual para la empresa planta productora de aceite de palma africana, "INVERSIONES LA MEJORANA" en el Departamento del Meta* (tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Colombia.
2. Anderson, D., Sweeney, D. y Williams, T. (2012). *Estadística para negocios y economía*. México, D.F.: Cengage Learning.
3. Andrés, G., Soler, V. y Bernabeu, E. (diciembre, 2017). Reingeniería de procesos. *3C Empresa: investigación y pensamiento crítico, Edición Especial*, 81-91. DOI: <https://dx.doi.org/10.17993/3cemp.2017.especial.81-91/>.
4. Campos, J., Lora, E., Meriño, L., Tovar, I., Navarro, A., Quispe, E. y Castrillón, R. (s.f.). *Eficiencia energética en la generación y distribución del vapor*. Colombia: Colciencias Colombia.
5. Castillo, E. F. (2007). Integración energética del proceso de extracción de aceite de palma. *Revista Palmas*, 28(especial), 93-104.
6. Díaz, B. y Noriega, M. (2017). *Manual para el diseño de instalaciones manufactureras y de servicios*. Peru: Universidad de Lima, Fondo Editorial.

7. Echeverry, A. (enero, 1995). Ahorro de energía y manejo de vapor. *Revista Palmas*, 16(especial), 138-157.
8. Escalera, G., Masa, C. y García, E. (2008). Implantación de la reingeniería por procesos: Actividades, técnicas y herramientas. *XXII Congreso Anual AEDEM, VI International Conference IABD*. 1-15. ISBN: 978-84-7356-556-1
9. García, S. y Fraile, D. (2008). *Cogeneración: Diseño, Operación y Mantenimiento de plantas de cogeneración*. España: Ediciones Díaz de Santos.
10. Garcia-Torres, J. (2017). *Estudio comparativo entre las diferentes fuentes de energía eléctrica en Colombia y la generación de electricidad a partir de biomasa*. Colombia: Fundación Universitaria Agraria de Colombia.
11. Gómez, A., Klose, W., Rincón, S. y Wiest, W. (enero, 2004). Transformación termoquímica de la biomasa residual del proceso de extracción del aceite de palma: tecnologías y perspectivas. *Revista Palmas*, 25(especial), 388-397.
12. Hernández, J., Lara, V. y Hernández, M. (octubre, 2020). Análisis del desempeño de una microturbina de adhesión alimentada con vapor generado con biomasa de desecho. *Memorias del XXVI Congreso Internacional Anual de la SOMIM*.

13. Jaimes, W. A., Rocha, S., Kafarov, V., & Vesga, J. N. (2012). *Análisis termodinámico del proceso real de extracción de aceite de palma africana*.
14. Junta de Castilla y León. (2010). *Manual técnico de diseño y cálculo de redes de vapor*. España: Autor.
15. Lostaunau, L. (junio, 2007). Calderas y turbinas de vapor para la generación de energía eléctrica. *Electrónica-UNMSM*, (19), 18-26.
16. Manganeli, R. (2004). *Cómo hacer reingeniería*. Bogotá: Editorial Norma.
17. Moreno-García, R. y Parra-Bofill, S. (mayo, 2017). Metodología para la reingeniería de procesos. Validación en la empresa Cereales Santiago. *Ingeniería Industrial*, 38(2), 130-142.
18. Muñoz, J. (2008). *Sistemas de generación eléctrica mediante calderas de vapor energizadas por radiación solar concentrada* (tesis de doctorado). Universidad Politécnica de Madrid, España.
19. Muñoz, J. (2015). *Proponer una metodología para comparar la alternativa de instalar una planta de cogeneración sobre los contratos vigentes de abastecimiento de vapor y electricidad hacia FPC* (tesis de maestría). Universidad del Desarrollo, Chile.
20. Nordelo, A. y González, A. (2010). *Combustión y generación de vapor*. Cuba: Editorial Universo SUR.

21. Oot, C., Choo, Y., Yap, S. y Ma, A. (enero, 1998). Refinación del aceite rojo de palma. *Revista Palmas*, 19(1), 61-66.
22. Ospina, R. (enero, 2006). La reingeniería de procesos: Una herramienta gerencial para la innovación y mejora de la calidad en las organizaciones. *Cuadernos Latinoamericanos de Administración*, III(2),91-99. ISSN: 1900-5016.
23. Pérez, G., Gisbert, V., & Pérez, E. (2017). Reingeniería de procesos. *3C Empresa*, 81-91.
24. Saldarriaga-Loaiza, J., Villada, F. y Pérez, J. (mayo, 2019). Análisis de Costos Nivelados de Electricidad de Plantas de Cogeneración usando Biomasa Forestal en el Departamento de Antioquia, Colombia. *Información tecnológica*, 30(1), 63-74. Doi: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642019000100063>.
25. Severns, W., Degler, H. y Miles, H. (2021). *La producción de energía mediante vapor, aire o gas*. España: Reverté.
26. Sosa, M. y Fushimi, A. (2000). *La cogeneración en el contexto de las tecnologías de conversión energética del futuro*. Argentina: Universidad Nacional de La Plata.
27. Spirax Sarco. (1999). *Distribución del vapor. Guía de referencia técnica*. Buenos Aires, Argentina: Spirax Sarco, S.A.

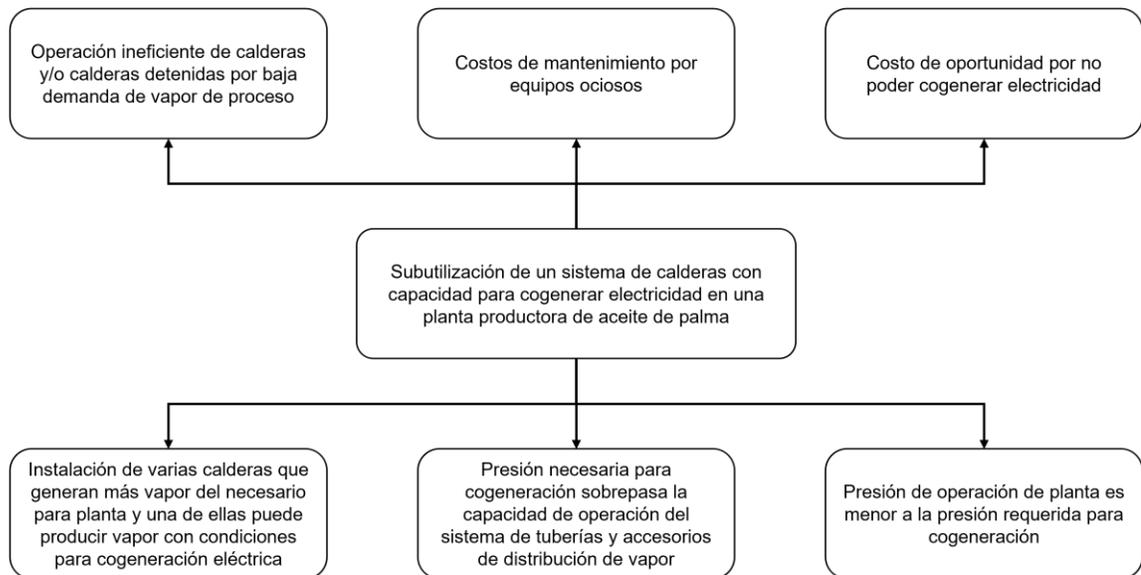
28. Van Dam, J. (2016). Subproductos de la palma de aceite como materias primas de biomasa. *Revista Palmas*, 37(Especial Tomo II), 149-156.
29. Vargas, D., Yáñez, E., García, J., Meneses, A. y Cuellar, M. (junio, 2011) Cogeneración con biomasa de palma de aceite en el sistema eléctrico colombiano: barreras, perspectivas y oportunidades. *Revista Palmas*, 32(3), 49-62.
30. Vega, L. y Rodríguez, L. (julio, 2007). Pérdidas de presión en tuberías de vapor. *Ciencias Holguín*, XIII(3), 1-10.
31. Velayuthan, A. (enero, 1986). Procesamiento y control del aceite de palma. *Revista Palmas*, 7(4), 19-33.
32. Verdezoto, L., Parco, F., Jácome, C., Katan, W. y Mora, A. (marzo, 2021) Energía Renovable a partir de la biomasa de caña de azúcar. *Revista De Investigación Talentos*, 8(1), 9-26. Doi: <https://doi.org/10.33789/talentos.8.1.140>.
33. Walworth. (2012). *Catálogo válvula bonete bridado fundido*. México: Industrial de válvulas, S.A. de C.V.
34. Yáñez, E., Ponce, F., Silva, E. y Castillo, E. (enero, 2008). Potencial de cogeneración de energía eléctrica en la agroindustria colombiana de aceite de palma: tres estudios de casos. *Revista Palmas*, 29(4), 59-72.

14. APÉNDICES

Se muestran los diagramas de análisis del problema (árbol del problema) y la matriz de coherencia, para mostrar la interrelación entre éste y los objetivos planteados.

En la siguiente figura se muestra el análisis causa-efecto del problema planteado:

Apéndice 1. Árbol del problema



Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Power Point.

En la siguiente figura se evidencia la línea de relación entre el problema, las preguntas a resolver y los objetivos del desarrollo de la investigación:

Apéndice 2. Matriz de coherencia

TEMA	TÍTULO	PROBLEMA	PREGUNTA CENTRAL	PREGUNTAS AUXILIARES	OBJETIVO GENERAL	OBJETIVOS ESPECÍFICOS
Aprovechamiento de la capacidad instalada para cogeneración eléctrica con vapor	Rediseño de un sistema de distribución de vapor para cogenerar electricidad en una planta productora de aceite de palma, utilizando principios de reingeniería	Sistema de distribución inadecuado para el uso de vapor a alta presión, que impide el aprovechamiento del excedente de vapor para cogeneración eléctrica en una planta productora de aceite de palma	¿Cuál es el mejor diseño para el aprovechamiento del excedente de vapor producido por una caldera acuotubular, en una planta de procesamiento de palma que desea utilizarlo para cogeneración eléctrica de autoconsumo?	¿Cuáles son los requisitos y características que debe tener un sistema de cogeneración con vapor?	Determinar el diseño óptimo del sistema de distribución de vapor para poder cogenerar electricidad y abastecer vapor al proceso productivo de aceite de palma	Establecer si las condiciones con las que opera el sistema de distribución de vapor permiten cogenerar electricidad.
				¿Qué aspectos del diseño del sistema original deben cambiarse para poder cogenerar electricidad y abastecer vapor para el proceso de producción?		Identificar los cambios que deben hacerse en la infraestructura para aprovechar la capacidad de cogeneración eléctrica, manteniendo el flujo de vapor hacia el proceso productivo.
				¿Cuál es la capacidad máxima de cogeneración con el diseño propuesto?		Determinar cuánta electricidad puede producirse con el diseño propuesto

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.