



**FACULTAD DE INGENIERÍA ARQUITECTURA
Y URBANISMO**

**ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE
INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA**

TESIS

**INCREMENTO DE LA EFICIENCIA TÉRMICA DEL
SISTEMA DE POTENCIA DE VAPOR MEDIANTE LA
APLICACIÓN DEL MÉTODO EXERGÉTICO EN LA
EMPRESA AGROINDUSTRIAL PUCALÁ S.A.A -
LAMBAYEQUE**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO MECÁNICO ELÉCTRICO**

Autor(es):

**Bach. Yave Soto Benetti Lorimer
Bach. Esquén Arana Bryan Salvador**

Asesor:

MSc. Villalobos Cabrera Jony

Línea de Investigación:

Energía – Gestión de la Energía

Pimentel – Perú

2017

**INCREMENTO DE EFICIENCIA TÉRMICA DEL SISTEMA DE POTENCIA
DE VAPOR MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL MÉTODO EXERGÉTICO
EN LA EMPRESA AGROINDUSTRIAL PUCALÁ**

Aprobación de la Tesis.

MSC. Ing. Rojas Coronel Ángel
Marcelo.
Presidente del Jurado de Tesis

MSC. Amaya Checa Manuel Luis
Secretario del Jurado de tesis

MSC. Ing. Villalobos Cabrera Jony
Vocal del Jurado de Tesis

Dedicatoria.

A:

Dios, por darme la oportunidad de vivir y por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de estudio.

Mi madre Amada Luz. A Soto Muños, por darme la vida, quererme mucho, creer en mí y porque siempre me apoyaste. Mamá gracias por darme una carrera para mi futuro, todo esto te lo debo a ti.

Mi abuela Berenice Muños Altamirano, por quererme y apoyarme siempre, esto también te lo debo a ti.

Mis hermanos, Bryan, Fernando y Katherine. Por estar conmigo y apoyarme siempre, los quiero mucho.

Benetti Lorimer Yave Soto

A:

Dios, por darme la oportunidad de vivir y por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de estudio.

A mis padres por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, en toda mi educación, tanto académica, como de la vida, por su incondicional apoyo perfectamente mantenido a través del tiempo.

Todo este trabajo ha sido posible gracias a ellos.

Bryan Salvador Esquén Arana

Agradecimiento.

A Dios por bendecirme para llegar hasta donde he llegado, porque hiciste realidad este sueño anhelado de culminar mis estudios universitarios.

A nuestros padres por el apoyo incondicional por consejos que nos ayudaron para poder llegar hasta este punto de nuestra vida

A la UNIVERSIDAD PRIVADA SEÑOR DE SIPAN por darme la oportunidad de estudiar y ser un profesional.

A mis docentes durante toda mi carrera profesional porque todos han aportado con un granito de arena a mi formación.

A mi asesor de Investigación y de Tesis de Grado, M. Sc. Ing Villalobos Cabrera Jony por su visión crítica de muchos aspectos cotidianos de la vida, por su rectitud en su profesión como docente, por sus consejos, que ayudan a formar como persona e investigador.

Al ing Jorge. W Oviden Núñez al habernos brindado la oportunidad de desarrollar nuestra tesis profesional en las plantas de producción de la empresa y por el apoyo y facilidades que nos fue otorgadas para realizar nuestra investigación.

Índice de figuras

Ítem	Nombre	Página
Figura 1.1	Vista satelital del Distrito Pucalá	04
Figura 1.2	Empresa Agroindustrial Pucalá	04
Figura 2.1	Ciclo rankine ideal	27
Figura 2.2	Sobrecalentamiento del vapor a altas temperatura	29
Figura 2.3	Incremento de la presión de la caldera	30
Figura 4.1	Distribución de exergía en el ciclo	85
Figura 4.2	Ciclo de vapor	86
Figura 4.3	Incremento distribución de exergía en el ciclo	99
Figura 4.4	Ciclo de vapor	100

Índice de gráficos

Ítem	Nombre	Página
Figura 4.1	Exergía de combustión	100
Figura 4.2	Trabajo de la turbina	101
Figura 4.3	Perdidas en la tubería	101
Figura 4.4	Eficiencia de la caldera	102
Figura 4.5	Eficiencia de la turbina	102
Figura 4.6	Rendimiento exergético	103

Índice de tablas

Ítem	Nombre	Página
Tabla 1.1	Cantidad de equipos por área de trabajo.	05
Tabla 3.1	Operacionalización de variables	36
Tabla 3.2	Composición química del bagazo.	42
Tabla 3.3	Constante de Calores específicos.	47
Tabla 3.4	Equipos y materiales para la recolección de datos	59
Tabla 3.5	Recursos humanos	59
Tabla 3.6	Características de las calderas a las que se aplica esta NTP	60
Tabla 3.7	Rangos y categorías de eficiencias térmicas (combustible/vapor) para calderas de vapor saturado.	61
Tabla 4.1	Chequeo de la caldera.	66
Tabla 4.2	Datos (presión y temperatura) de la caldera 1	68
Tabla 4.3	Datos (presión y temperatura) de la caldera 2	68
Tabla 4.4	Datos (presión y temperatura) de la caldera 3	68
Tabla 4.5	Datos (presión y temperatura) de la caldera 4	69
Tabla 4.6	Datos (presión y temperatura) de la caldera 5	69
Tabla 4.7	Análisis de gases en la combustión	70
Tabla 4.8	Inspección visual de los turbogeneradores	76
Tabla 4.9	Datos del turbogenerador Siemens	77
Tabla 4.10	Datos del Turbogenerador Worthington	77
Tabla 4.11	Datos de las Turbinas de Trapiche	79
Tabla 4.12	Datos para calcular el ciclo de exergía	84
Tabla 4.13	Resultados del cálculo de exergía	84
Tabla 4.14	Eficiencia exergéticas del ciclo de vapor	85
Tabla 4.15	Temperatura ideal de los gases de la chimenea	86
Tabla 4.16	Datos (presión y temperatura) de la caldera 1	87
Tabla 4.17	Datos (presión y temperatura) de la caldera 2	87
Tabla 4.18	Datos (presión y temperatura) de la caldera 3	87
Tabla 4.19	Datos (presión y temperatura) de la caldera 4	88
Tabla 4.20	Datos (presión y temperatura) de la caldera 5	88
Tabla 4.21	Datos del turbogenerador Siemens	91
Tabla 4.22	Datos del Turbogenerador Worthington	91
Tabla 4.23	Datos ideales de las turbinas del trapiche	93
Tabla 4.24	Comparación de eficiencias térmicas	97
Tabla 4.25	Datos necesarios para incremento de exergía	98
Tabla 4.26	Resultados del incremento de exergía del ciclo de vapor	98
Tabla 4.27	Incremento de eficiencias de exergía	99
Tabla 4.28	Balance económico para incrementar la eficiencia térmica	106

Resumen.

El consumo de energía, y las dificultades que existen para satisfacer su creciente demanda, están anticipando un escenario de crisis energética global, lo que ha motivado la búsqueda de nuevas fuentes de energía alternativa y además se ha aumentado el interés por implementar procesos que estén orientados al ahorro energético.

Partiendo de la pregunta ¿Cómo incrementar la eficiencia térmica del sistema de vapor de la empresa agroindustrial Pucalá S.A.A manteniendo la sencillez, aplicabilidad, y bajo costo? Se inicia la investigación del proyecto.

El desarrollo del proyecto está justificado debido a los problemas generados por la pérdida de energía en procesos industriales o sistemas termodinámicos, que ha afectado el rendimiento en la transformación energética, es necesario proveer un conocimiento sobre la disposición de la energía en los distintos procesos, y por ello, adoptar e implementar un procedimiento o metodología sistemática, que permita tomar decisiones basadas en variables termodinámicas.

Entre los objetivos del proyecto esta realizar una serie de cálculos térmicos y exergéticos que nos brinden una visión del estado actual de la empresa y luego generar un listado de buenas prácticas que ayuden a incrementar la eficiencia térmica de la empresa.

Los métodos usados para esta investigación es la observación y revisión de documentos, para la recolección de información se hace con la ayuda de termómetros. Manómetros, pirómetros y entrevistas, los datos obtenidos en la empresa son calculados y evaluados.

Los resultados de la investigación son que la empresa se encuentra con una eficiencia térmica actual de 21.22%, si se aplicaran las prácticas propuestas en el capítulo IV la eficiencia térmica se incrementaría hasta un 25.13% aproximadamente.

Se concluye que usar el método exergético es más preciso y ayuda a observar claramente cuanta y donde la energía se está desperdiciando en la empresa.

Abstract.

The consumption of energy, and the difficulties that exist to satisfy its growing demand, are anticipating a scenario of global energy crisis, which has motivated the search for new sources of alternative energy and also has increased the interest to implement processes that are oriented to energy saving.

Starting from the question How to increase the thermal efficiency of the steam system of the agro-industrial company Pucalá S.A.A, maintaining the simplicity, applicability, and low cost? The project investigation begins.

The development of the project is justified due to the problems generated by the loss of energy in industrial processes or thermodynamic systems, which has affected the performance in the energy transformation, it is necessary to provide knowledge about the disposition of the energy in the different processes, and Therefore, adopt and implement a systematic procedure or methodology that allows decisions to be made based on thermodynamic variables.

Among the objectives of the project is to perform a series of thermal and exergy calculations that provide us with a view of the current state of the company and then generate a list of good practices that help increase the thermal efficiency of the company.

The methods used for this research is the observation and review of documents, for the collection of information is done with the help of thermometers. Manometers, pyrometers and interviews, the data obtained in the company are calculated and evaluated.

The results of the investigation are that the company meets a current thermal efficiency of 21.22%, if the practices proposed in chapter IV were applied, thermal efficiency would increase to approximately 25.13%.

It is concluded that using the exergy method is more precise and helps to clearly observe how much and where the energy is being wasted in the company.

Key Word.

Exergía, mantenimiento, caliche, destrucción de exergía, trapiche, ciclo Rankine.

Introducción.

La presente tesis es una investigación que tiene por objetivo seleccionar el conjunto de prácticas óptimo para el incremento de la eficiencia térmica del sistema de potencia de vapor de la empresa agroindustrial Pucalá S.A.A, manteniendo la simplicidad, aplicabilidad y bajo costo. Los datos se obtuvieron de:

Los diferentes tipos de recolección de datos como, por ejemplo, el análisis de algunos documentos de la empresa, revisión de planos, tablas de termodinámica, mediciones de datos en las calderas, bombas, turbinas y turbogeneradores.

Este trabajo presenta los siguientes capítulos :

En el capítulo I se presenta la situación problemática a nivel Internacional, a nivel de Latino América, a nivel Nacional y a nivel Local. Además de la formulación del problema, delimitaciones y limitaciones de la investigación, justificación y los objetivos generales y específicos a los que va a llegar la investigación.

En el Capítulo II se abordan los aspectos de los antecedentes de la investigación y el estado en el que se encuentra en la actualidad este tema, además de esto se habla de la teoría relacionados la investigación, en este capítulo se encontrara toda la información necesaria para entender lo que se ha trabajado en el capítulo V, además de definir la terminología del tema de investigación.

En el Capítulo III en este estudia cual es el tipo y diseño de la investigación además de hablar también de la población de estudio del proyecto y de cómo se va a obtener los datos y cual es procedimiento que se tiene en cuenta para realizar los cálculos del capítulo IV

En el Capítulo IV se ofrece los cálculos obtenidos gracias a los datos obtenidos de la investigación de los proyectistas.

En el Capítulo V se presentan las propuestas de la investigación que en donde se nombran propuestas para investigaciones futuras que ayudan a incrementar la investigación del tema estudiado.

En el capítulo VI se ofrece las conclusiones del estudio del tema investigado además las recomendaciones que se debe tomar en cuenta cuando se quiera estudiar temas como el estudiado en la presente tesis.

Como parte final se observa las fuentes bibliográficas provienen de años de investigación en especial de libros, tesis, artículos científicos, revistas. La bibliografía fue contrastada con la realidad de nuestro país en cuanto a la problemática que atraviesa las industrias en el Perú.

INDICE.

CAPITULO I.....	1
1 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	2
1.1 Situación problemática.....	2
1.1.1 A nivel internacional.....	6
1.1.2 A Nivel De Latino América.....	8
1.1.3 A nivel nacional.....	10
1.1.4 A nivel local.....	13
1.2 Formulación del Problema.....	14
1.3 Delimitación de la investigación.....	14
1.4 Justificación e importancia de la investigación.....	14
1.4.1 Justificación.....	14
1.4.2 Importancia.....	16
1.5 Limitaciones de la investigación.....	16
1.6 Objetivos de la investigación.....	17
1.6.1 Objetivo General.....	17
1.6.2 Objetivos Específicos.....	17
CAPITULO II.....	18
2 MARCO TEÓRICO.....	19
2.1 Antecedentes de estudio.....	19
2.2 Estado del Arte.....	20
2.3 Bases Teórico Científicas.....	22

2.3.1	Generadores de Vapor.....	22
2.3.2	Turbina de Vapor.....	23
2.3.3	Pérdidas de Vapor.....	23
2.3.4	Requerimientos de Vapor.....	23
2.3.5	Bombas Centrífugas.....	24
2.3.6	Irreversibilidades.	24
2.3.7	Exergía.....	26
2.3.8	Ciclo Rankine	26
2.4	Definición De La Terminología.....	31
2.4.1	Incremento	31
2.4.2	Eficiencia Térmica.....	31
2.4.3	Ciclos De Potencia.....	31
2.4.4	Método Exergético	31
CAPITULO III	32
3	MARCO METODOLÓGICO.....	33
3.1	Tipo y diseño de la investigación	33
3.1.1	Tipo de investigación.....	33
3.1.2	Diseño de la investigación.....	33
3.2	Población y Muestra	35
3.2.1	Población	35
3.2.2	Muestra	35
3.3	Hipótesis.....	35

3.4	Variables.....	35
3.4.1	Variable independiente.....	35
3.4.2	Variable dependiente	35
3.5	Operacionalización de variables.....	36
3.6	Métodos, técnicas e instrumentos de recolección de datos.	37
3.7	Procedimiento para la recolección de datos.	40
3.7.1	Diagrama de flujo de procesos:.....	40
3.7.2	Descripción de procesos.	41
3.8	Análisis estadístico de datos e interpretación de datos	62
3.9	Principios éticos.....	62
3.10	Criterios de rigor científico	63
CAPITULO IV	64
4	Resultados en tablas y gráficos.	65
4.1	Impacto de las buenas practicas sobre la eficiencia térmica	65
4.1.1	Balance térmico.....	65
4.1.2	Balance de exergético.....	83
4.1.3	Incremento de eficiencia térmica en el ciclo de potencia de vapor Con ayuda de buenas Prácticas	86
4.1.4	Selección de buenas prácticas para incrementar la eficiencia. 103	
4.1.5	Balance económico para incrementar la eficiencia térmica.	106
4.2	Discusión de resultados.....	106
CAPÍTULO V	108

5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	109
5.1	Conclusiones.....	109
5.2	Recomendaciones.....	110
	Bibliografía.....	111
	Anexos.....	116

CAPITULO I

1 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 Situación problemática.

En la actualidad el mundo consume grandes cantidades de energía, y los problemas que se tiene para solventar esas demandas es preocupante ya que nos anticipan un escenario de crisis energética global, ahora muchas empresas optan por buscar nuevas fuentes de energía alternativa, también implementan procesos de ahorro de energía en sus plantas de producción.

Además los problemas medio ambientales están preocupando al mundo entero ya que los cambios también ambientales tiene como causante las emisiones de gas, por lo que las nuevas alternativas para mejorar el abastecimiento energético deben ser opciones que minimicen o que no tengan implicaciones ambientales negativas. Para lograrlo, se requiere mejorar la eficiencia con la que se utiliza la energía y reducir las emisiones de contaminantes. Por lo tanto, a nivel industrial se habla sobre conservación de recursos, control de emisiones y ahorro de energía; de ahí que la tecnología vaya encaminada a la búsqueda de procesos más eficientes, con una mejor disposición de la materia prima y un mejor control en sus emisiones al ambiente, de tal forma que se reduzca el impacto que tiene el proceso con el medio ambiente.

En el Perú un tipo de empresa que hace uso de la energía de vapor a gran escala son las industrias azucareras. En estas industrias se hace necesario evaluaciones energéticas y exergéticas y tomarlas como base para la optimización de los procesos con miras a la minimización de pérdidas de energía.

La empresa agroindustrial Pucalá S.A.A que es una empresa azucarera ubicada en el distrito de Pucalá, provincia de Chiclayo, región Lambayeque.

Pucalá está situada en la parte norte de la costa peruana, al este de la provincia de Chiclayo; exactamente a 30.1 kilómetros de esta ciudad.

Sus coordenadas geográficas son: 6° 46' 41.62" latitud sur; y de 79° 36' 41.30" latitud oeste.

La evolución histórica de la Empresa Agroindustrial Pucalá S.A.A., desde 1908 a la fecha ha pasado por tres grandes etapas: Época de Hacienda (1908 - 1969), Época Cooperativa (1970 - 1999) y Época de Privatización (1999 – a la fecha).

La Variedad de producción de la empresa Agro Pucalá actualmente sólo produce Azúcar B2 o azúcar rubia doméstica comercial, destinada para el consumo doméstico; sin embargo, años atrás (Época Hacienda y Cooperativa), Pucalá produjo también azúcar refinada, comúnmente llamada azúcar blanca, destinada igualmente para el consumo humano y Azúcar Bexp o de exportación que se vendía al extranjero.

De una tonelada de caña molida, se obtiene en promedio entre 100 a 110 kilos de azúcar y de 20 a 30 kilos de melaza. Definitivamente que la cantidad de azúcar que se obtenga por tonelada, está en función de la calidad de caña molida. Por ejemplo; para obtener más de 100 kilos de azúcar de una tonelada de caña, ésta debe estar en un porcentaje promedio de sacarosa de 13.00 %.

Como referencia histórica podemos citar que en 1974 se obtuvo una producción de 113,043.881 toneladas métricas de azúcar, lo cual constituyó un record en aquella época. (google.com)



Figura 1.1 Vista satelital del Distrito de Pucallá

Fuente: Google maps



Figura 1.2 Empresa Agroindustrial Pucallá

Fuente Google maps

Describiremos solo algunos equipos de procesos críticos y dentro de estos; aquellos que cumplen con los factores para ser declarados prioritarios.

A continuación, en la siguiente tabla se aprecia cuales se escogieron:

Tabla 1.1 Cantidad de equipos por área de trabajo.

AREA	EQUIPO	CANTIDAD
Trapiche	Turbinas	5
Calderas	Calderas	5
	Desaireador	1
Recepción y preparación de la caña	Desfibrador	1
	Molinos	5
	Reductores de velocidad	5
Torres de enfriamiento	Bombas	7
Sistema de generación eléctrica	Turbo generador	1

Fuente: Empresa Agroindustria Pucalá – Área de Producción.

La empresa agroindustrial Pucalá S.A.A que tiene como fuente de energía, el vapor, el cual es utilizado para girar los álabes de las turbinas, La energía mecánica de las turbinas es utilizada para mover los molinos en donde se extrae el jugo de la caña el que se usa para fabricar el azúcar, licores como el ron y también para la generación de eléctrica de consumo de la empresa. Uno de los problemas de la empresa son las pérdidas de energía en el transporte del vapor, además se sabe que muchos de sus equipos de la planta de generación de vapor son de vida útil muy elevada (antiguos) lo cual hace que su rendimiento no sea el adecuado debido al desgaste de las maquinas por las horas de uso, además de la baja capacitación de los trabajadores de la empresa, estos como otros problemas más a los que se enfrenta la empresa hace que no se esté obteniendo el adecuado rendimiento de la planta de generación de vapor.

Si se pondría en marcha el uso de buenas prácticas, en la planta de generación de vapor se garantiza el incremento de la eficiencia térmica del ciclo de potencia de vapor de la empresa.

1.1.1 A nivel internacional

a) España.

En el esfuerzo de disminuir el consumo energético en el alto horno y a la sustitución del coque por combustibles auxiliares, un estudio realizado por (A. Babich, L. García, J. Vega, A. Formoso, A. Cores, 1998). Hicieron un balance termodinámico basado en la utilización de la exergía. El Consejo Superior de Investigaciones Científicas en España realizó un estudio sobre balances exergéticos realizados en el alto horno para las condiciones de operación, dado a que surgía la necesidad de mejorar la calidad de utilización de la energía generada. Mediante los respectivos cálculos referente a su investigación los autores de esta investigación.

Aportaron la siguiente conclusión, que “cuando se inyectan combustibles auxiliares por la tobera, indica que la utilización de gas natural no es efectiva en la inyección de carbón pulverizado (ICP) crece con el aumento del caudal de inyección”. Además, recomendaron que “la utilización de la inyección de carbón pulverizado en combinación con el enriquecimiento del viento con oxígeno aumenta la generación de energía en la combustión”.

b) Estados Unidos.

(A. V. Chamchine, G. M. Makhviladze, O. G. Vorobyev, 2006). La solución de los problemas ambientales es un gran reto al ingenio humano. “Las consecuencias negativas de la actividad humana siguen generando problemas ecológicos, se refleja en una creciente ola de demandas para la adopción de medidas correctivas inmediatas. Por desgracia, este tipo de llamadas con frecuencia no más de reiterar la necesidad de protección del medio ambiente y el plomo, en el mejor de los éxitos aislados y parciales, más típicamente en el bloqueo de la construcción de alguna planta dañina para el medio ambiente. Es mucho más difícil hacer frente a los problemas asociados con objetos industriales ya establecidos, sobre todo si son obviamente rentables. En la mayoría de estos casos las prioridades económicas prevalecerán incluso si se producen daños ambientales.

Las raíces del problema se remontan a la falta de conciencia ecológica en la planificación de proyectos industriales. Los Indicadores sistémicos son raros. Se proponen indicadores de exergía para la evaluación integral de la calidad ambiental.

Se sugiere la aplicación de cálculos exergéticos como un potencial termodinámico especial para caracterizar el peligro ambiental, que genera el mal uso de la energía.

La exergía determina el trabajo, que se realiza en el entorno local. Indicadores de exergía basados en cálculos termodinámicos rigurosos se pueden utilizar para mejorar el uso de los recursos energéticos y reducir la degradación ambiental.

1.1.2 A Nivel De Latino América

a) Colombia.

La gran cantidad de consumo de energía fósil que se está utilizando a nivel mundial y la cantidad de contaminación que genera el alto precio del petróleo y la tendencia continúa acrecentándose además del agotamiento de las reservas ha afectado a la seguridad energética global. La necesidad de este tipo de energía en países industrializados y economías emergentes (China, India, Brasil etc.) Los investigadores (Yeimmy Peralta, Eduardo Sanchez, Viatcheslav Kafarov, 2012) llegaron un su estudio llegan a la conclusión que el análisis de exergía es una poderosa herramienta para la evaluación de la eficiencia de la producción de biocombustibles que es la tercera generación a partir de biomasa de micro algas. Los resultados muestran una eficiencia de exergía del 79%, por lo tanto, es necesario aumento del número de recirculaciones para el proceso.

Así es que en Colombia como en otros países se afronte estos mismos tipos de problemas haciendo estudios exergéticos cuantificar las pérdidas de energía para luego tratar de reducir al máximo las pérdidas de energía.

b) Argentina.

(Dora Paz y Gerónimo J. Cárdenas, 2005). publicaron su estudio de investigación titulado “Valoración Económica De Las Pérdidas De Exergía De Las Operaciones Térmicas En La Industria Azucarera De Caña”, en donde hacen un estudio en el cual calculan la cantidad de pérdidas en los generadores de vapor de la industria azucarera de caña, esas pérdidas las valorizan mediante diagramas y tablas

en las cuales aportan con su estudio que “Si se realizan los diagramas de exergía de todas la central (generador de vapor más ciclo de potencia) resultaría que en el condensador se localizan alrededor de $\frac{3}{4}$ partes de las pérdidas totales de energía, si se pretende recuperar trabajo o energía eléctrica que es el objeto central, de ese flujo de energía, no se conseguiría más de la décima parte del mismo. Es decir, a la luz del segundo principio de la termodinámica, solo se podía recuperar trabajo por un valor igual a la perdida de exergía localizada realmente en el condensador, que se supone en magnitud menor a 5% del global de pérdidas” además recomiendan que “no se debe de interpretarse como que el análisis energético es algo que debe de ir quedando en desuso, sino más bien al contrario, las dos modalidades (análisis energético y exergético) de análisis son completarías y entre ambas es posible un mejor acercamiento a la realidad de los procesos transformadores de energía.

c) Cuba.

Mediante la publicación de un estudio titulado “Procedimiento Para La Valoración De La Sostenibilidad Energético Ambiental De Estrategias Energéticas” de los autores (Dr. Víctor Samuel Ocaña Guevara, Dr. Candido Quintana Pérez, Dr. Jo Dewulf, Dr. Pablo Roque Díaz, 2008). tienen en cuenta los constituyentes, de sostenibilidad y en especial su componente energética la cual constituye un punto central, organizados de forma sistémica en los indicadores de la reutilización de la energía, de eficiencia de los sistemas de transformación de limpieza de la exergía consumida y auto satisfacción exergética del sistema,

El sistema de indicadores forma la base de la deducción para la determinación del Índice de Sostenibilidad Energético Ambiental (ISEA), aplicado a la Provincia de Villa Clara, Cuba”.

La eficiencia exergética de las plantas térmicas que son la asiento del sistema electro energético cubano se hallan en el orden del indicador eficiencia exergética) fluctuando cerca de 0.255.

Los autores aporta en su investigación que, el Índice de sostenibilidad energético ambiental (ISEA) toma el valor de 0.202, muy parecido al coste del indicador de limpieza de la exergía consumida lo que se debe a la gran influencia que sobre el costo exergético total tiene el precio relacionado con el impacto ambiental de los agentes contaminantes que son derramadas al ambiente.

1.1.3 A nivel nacional

La progresiva demanda de combustibles fósiles, así como las la carestía y el continuo aumento de los costos de los carburantes procedentes del petróleo son los rasgos más esenciales para el futuro energético mundial. Como resultado de esta perspectiva brota la necesidad de organizar al máximo la elaboración y uso de energía, optimando la eficiencia de todos los procesos de la cadena sin pérdida de la calidad de vida.

En Perú una cantidad de las industrias cuenta con sus adecuadas plantas de generación de energía eléctrica, con la propósito de autoabastecerse, Teniendo en cuenta que crear su propia energía eléctrica es más económicos y que se inspecciona mejor el abastecimiento de energía continua a sus métodos de producción,

impidiendo dificultades como el caro precio de la energía, deficientemente servicio, pésima calidad, apagones continuos y dependencia de otras plantas de energía. Además, con la propósito de que su proceso se realice de manera eficaz y con intenciones al progreso continuo.

a) Lima.

En un estudio realizado por (Valle, 2014) titulado “Análisis energético y exergético de la implementación del ciclo combinado en la central térmica de – Santa Rosa” publicada en el 2014. Muestra una manera de optimizar la mayor cantidad de energía. En este estudio él concluye que al mejorar un ciclo combinado mediante un análisis exergético podía ahorrar energía eléctrica ya que Los métodos de combustión siempre estarán unidos a muchas pérdidas de exergía por irreversibilidades, además de hallar que en la cuarto de combustión (39.22%) y la caldera de recuperación (9.87%) son los equipos donde la exergía mas se destruye (pérdidas de energía) contribuyen en todo el ciclo combinado, de la central térmica de – Santa Rosa, estos simboliza casi el 50% de la exergía arruinada.

El mismo problema casi siempre se presente en la mayoría de las calderas de las empresas industriales, su investigación es tomada de referencia para tomar medidas adecuadas para poder incrementar la eficiencia de las calderas.

b) Piura.

(Chanampa, 2010). En su tesis titulada “Análisis Energético De Un Sistema De Cogeneración con ciclo combinado y gasificación Para la Industria Azucarera”. Entre sus deducciones alcanzadas,

Comparando un sistema de ciclo combinado, con uno de ciclo de turbina de vapor, las ventajas del primero sobre el segundo son irrefutables, ya que una turbina de gas puede llegar a entregar el doble del trabajo neto producido por la turbina de vapor, por ejemplo, para el análisis energético realizado la turbina de vapor producía 14.6 MW, mientras que en el ciclo combinado puede generar 38.9 MW. Esta mejora, de todas formas, cubrirá en cierto tiempo la inversión adicional que se tenga que realizar por los nuevos equipos o dispositivos que supone el ciclo combinado. A esto se le puede sumar la gasificación, obteniendo excelentes resultados.

c) Lambayeque.

los análisis estadísticos realizadas, parecen mostrar con cierta claridad que las sociedades avanzadas no solamente demandan más energía, sino que, además, presentan un claro desplazamiento hacia su utilización en forma más cómoda y amigable, atributo en el que la electricidad es insuperable.

Se plantean agudos problemas estratégicos, dos de ellos, se sitúan en lugar preferente del debate sobre el futuro del suministro mundial de energía:

Energía primaria a emplear en la generación de Electricidad y el Impacto medio ambiental de la generación de la Electricidad. El doctor (Paz, 2012). En su tesis titulada “Metodología de análisis exergético a las plantas de potencia de ciclos combinados Gas vapor Perú” publicada en el año 2012. En este trabajo de tesis, son estudiadas y evaluadas cuatro combinaciones de Ciclos Combinados Gas-Vapor, son investigadas mediante la metodología energética y

exergética. En cada caso fija algunos parámetros basados configuraciones conocidas, considerando que todas estas tienen en común un Ciclo Simple de Turbina de Gas, al cual se le ha fijado como parámetro de operación una potencia eléctrica generada equivalente a 250 MW.

1.1.4 A nivel local

En el sector de Pucalá, concretamente en la empresa agroindustrial Pucalá S.A.A hay procesos que absorben mucha energía, la cual es generada gracias a su planta de reproducción eléctrica de ciclo Rankine.

Ya que la antigüedad de algunos equipos y al desperdicio de energía causado por irreversibilidades del ciclo, significa una gran pérdida de energía para la empresa se ha considerado preciso hacer un análisis termodinámico y exergético que admita determinar cuán eficaz es el proceso de reproducción eléctrica, por medio de un análisis referente al uso real que se le da a los carburantes energéticos.

De la investigación nace de la necesidad de evaluar el aprovechamiento de la energía en técnicas de elaboración de sistemas termodinámicos en la Empresa Agroindustrial Pucalá S.A.A, orientándose principalmente en servicios industriales. Se aspira calcular cuán eficaz es el ciclo en la producción de vapor, de igual manera precisar medidas para la identidad de los puntos críticos que se tienen que inspeccionar para que se dé la más alta producción de trabajo posible o aproximar a ella.

1.2 Formulación del Problema.

¿Cómo incrementar la eficiencia térmica del sistema de vapor de la empresa agroindustrial Pucalá S.A.A manteniendo la sencillez, aplicabilidad, y bajo costo?

1.3 Delimitación de la investigación.

El presente proyecto de investigación limita su aplicación a dar alternativas de buenas prácticas para incrementar la eficiencia térmica del ciclo de vapor de la empresa Agroindustrial Pucalá SAA. A través de la elaboración e interpretación de un análisis térmico y exergético de la planta de vapor de la empresa.

1.4 Justificación e importancia de la investigación.

1.4.1 Justificación

a) Técnica

Los inconvenientes creados por las pérdida de energía en procesos industriales o sistemas termodinámicos, ha afectado el rendimiento en la transformación energética, es necesario formular maneras de solucionar estos problemas que afectan a todos los sistemas que trabajan con energía eléctrica, crear un procedimiento metodológico sistemático, que ayude a tomar decisiones ante variables termodinámicas.

b) Económica.

El eficaz uso de la energía es un adelanto frente a un posible colapso energético, ante esto, se está analizando cómo es posible aumentar el rendimiento de los procesos industriales, para operar con eficiencia, y así generar ganancias energéticas y con ellas incrementar la producción de la empresa lo cual conlleva a obtener ganancias económicas.

c) Ambiental.

La contaminación ambiental es un problema en el cual muchos estudios se están centrando uno de los métodos que mejoran la calidad de producción energética es generando buenas prácticas industriales que aumenten la eficiencia térmica de la planta para mejorar su eficiencia y con ello disminuimos la emisión de gases contaminantes como el monóxido.

d) Social.

La selección de buenas prácticas industriales tiene gran impacto en diversos aspectos a nivel social los motivos por los cuales realizamos esta investigación son diversos como por ejemplo en el área administrativa de la empresa, debido a que mientras más eficiente sea la generación de vapor, mayor será la producción de la empresa lo cual es lo que buscan todas las empresas no solo azucareras si no todas las empresas industriales.

Aplicando buenas prácticas se garantiza un incremento de la eficiencia de la empresa, y este método de trabajo de la empresa puede ser tomada como ejemplo para otras empresas que también estén pasando por problemas similares.

1.4.2 Importancia.

La importancia del proyecto radica en que nos permite obtener más ganancias económicas que es lo que toda empresa busca además de eso este estudio brinda mediante cálculos el estado actual de la empresa, para luego hacer las correcciones preventivas necesarias y personalizadas a las necesidades de la empresa.

Si se aplicaran las prácticas propuestas en la investigación se tendría como resultado que la empresa utilice menos energía además de la reducción de paradas de la empresa por fallas en la planta de producción debido a la aplicación de las buenas prácticas propuestas. Esta disminución en ambos aspectos es bueno porque se contribuye con el medio ambiente reduciendo la cantidad de emisiones contaminantes al medio ambiente.

1.5 Limitaciones de la investigación.

En este estudio se encontraron limitaciones como la falta de ayuda de los obreros de la empresa ya que los operarios se negaron a llenar las encuestas que les pedimos que llenaran.

También tuvimos problemas cuando pedimos información sobre las placas de las calderas las cuales tenían información importante para la investigación del proyecto, estas placas de las calderas ya no se encuentran debido a que estas son muy antiguas y se han perdido con el transcurrir del tiempo.

El acceso a la empresa para obtener información es muy restringido y se tiene que pedir permiso con previo aviso limitando las visitas.

1.6 Objetivos de la investigación

1.6.1 Objetivo General.

Incrementar la eficiencia térmica del sistema de potencia de vapor de la empresa agroindustrial Pucalá S.A.A, manteniendo la simplicidad, aplicabilidad y bajo costo.

1.6.2 Objetivos Específicos.

1. Realizar el balance térmico del sistema de potencia de vapor brindando como resultado la eficiencia térmica y potencia neta extraída.
2. Identificar y reconocer las buenas prácticas existentes para el incremento de la eficiencia térmica del sistema de potencia de vapor de la empresa agroindustrial Pucalá S.A.A.
3. Determinar el estado actual de eficiencia térmica del sistema de vapor mediante la aplicación de un método exergético; usando las herramientas de software de ingeniería (e.g, MATLAB®, Excel).
4. Establecer el grupo de buenas prácticas óptimas para cada subsistema (local) y para toda la planta (global) usando como criterios: sencillez del método, la aplicabilidad al sistema local y bajo costo y aprovechamiento máximo de exergía.

CAPITULO II.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de estudio.

(Benedict, M. y Gyftopoulos, E., 1949). Determinaron los precios aplicables a las irreversibilidades de una planta de disgregación de aire y los manejó como juicios para obtener el esquema óptimo.

El concepto de exergía es la consecuencia del estudio termodinámico en las máquinas térmicas. A través de los años muchos científicos como (Kestin, 1980) y (Tsatsaronis, 1987) realizaron una examen histórica de la aparición, desarrollo teórico y uso del término de exergía y del análisis exergético. (Liu, Y. y Wepfer W., 1983) Hacen una recopilación bibliográfica exhaustiva, recogiendo más de 600 referencias.

El vocablo “exergía” fue insinuado por (Rant y Zoran, 1956), y fue manejado para describir el trabajo máximo que se puede obtener en un sistema termodinámico cuando se concretaban condiciones de idealidad. El termino fue estudiado y usado por (Gouy, 1889) y (Stodola, A. y Lowenstein L., 1910) en sus trabajos, quienes de forma independiente formularon una ley que recibió su nombre.

(Liu, Y. y Wepfer W., 1983) Y (Szargut, 1980) dieron una nueva perspectiva del análisis termodinámico fundamentado en el segundo principio, fue aportada por (Bosnjakovic, 1967) ya que en su trabajo se enfocó en los efectos negativos de las irreversibilidades en procesos. Además, formuló nuevos criterios de rendimiento y técnicas de evaluación de procesos.

Las propuestas iniciales de asignación de costos a los productos de una instalación se efectuaron por (Keenan, 1932), que calculó el costo del vapor y el trabajo producidos en una planta de cogeneración basándose en su exergía.

2.2 Estado del Arte.

(Georgescu-roegen, 1971), Fue uno de los primeros autores que se dio cuenta de la relación entre el proceso económico y la segunda ley de la termodinámica. En su trabajo afirma que la “ley de la entropía emerge como la más económica de la naturaleza y esta ley es la base de la economía de la vida en todos los niveles”. Además manifiesta la importancia de la variable tiempo en la actividad económica, que se muestra notoriamente en la irreversibilidad de la explotación de recursos

(Ayres, R. y Nair, I., 1984), estos autores aseveraron que la segunda ley de la termodinámica tiene ciertos resultados en el proceso productivo que no están expresadas apropiadamente en el modelo económico. Entre estos resultados está que la exergía del producto total de un sector debe ser menor a la exergía de ingreso

(Kotas, 1986), en su indagación sobre la aplicación del método exergético en el análisis de plantas térmicas y químicas, el cual contribuye un gran análisis sobre las posibles aplicaciones del análisis exergético (auditoría energética, estimación de costos, optimización termoeconómica, síntesis de procesos, etc.) y las herramientas y técnicas utilizadas (criterios de eficiencia, diagramas, tablas, coeficientes, etc.

(Ruth, 1993), afirmó que los usos en técnicas de producción económicos deben considerar los límites de la termodinámica en el uso de materia y energía, para ser óptimos en el largo plazo. Y las decisiones económicas deben considerar la limitación de los recursos disponibles, la interconexión del sistema económico con otros componentes del ecosistema, la preferencia temporal de los consumidores y productores y las tecnologías con las que se transforman materia y energía en el proceso productivo.

Actualmente este término ha sido tomado como referente para definir cuan eficiente es un proceso y se ha venido desarrollando con la finalidad de confirmar su validez, se ha tomado el término de exergía como indicador de eficiencia energética.

(Arroyave, et al., 2004). Emplearon un análisis de energía y exergía a una torre de destilación convencional, propusieron la posibilidad de hacer un dispositivo adicional como alternativa para reducir la exergía arruinada, concluyendo que la realización del estudio permite el aumento de la eficiencia energética y el mejoramiento de los procesos industriales.

(Carrillo, G., et al., 2007), en su estudio plantea una metodología para efectuar auditorías exérgicas, como columna a un plan de uso eficiente de la energía, empleando al sistema de bombeo del acueducto metropolitano de Bucaramanga.

Esta tesis de investigación se propone buenas prácticas que se adapten a las necesidades de la empresa agroindustrial Pucalá para una empresa agroindustrial a raíz del análisis del método exérgico es en la aplicación del método exérgico.

2.3 Bases Teórico Científicas.

2.3.1 Generadores de Vapor.

La generación de vapor es el proceso de transformar el agua en vapor medio de la aplicación de calor como los generadores humotubulares llamados también Pirotubulares y los generadores acuotubulares.

- **Las calderas Pirotubulares:** Están dotadas de tubos rodeados de agua y a través de cuyo interior pasan los gases de la combustión. Este tipo de calderas se usan generalmente en donde la demanda de vapor es relativamente pequeña, no se utiliza para el accionamiento de turbinas, su alimentación depende de su tamaño y en la adaptabilidad de su diseño. Estas calderas trabajan con una eficiencia del 70% aprox. (Cengel & Boles, 2009).
- **En calderas acuotubulares:** Los tubos contienen en su interior el vapor y el agua, mientras que el fuego es aplicado en la superficie exterior de los mismos y los gases calientes se dirigen a través del exterior de los tubos, este tipo puede proyectarse para quemar cualquier tipo de combustible en diversos tipos de parrilla. (Cengel & Boles, 2009).

2.3.2 Turbina de Vapor.

La turbina de vapor es una máquina de fluido en la que la energía de éste pasa al eje de la máquina saliendo el fluido de ésta con menor cantidad de energía. La energía mecánica del eje procede en la parte de la energía mecánica que tenía la corriente y por otra de la energía térmica disponible transformada en parte en mecánica por expansión. Esta expansión es posible por la variación del volumen específico del fluido que evoluciona en la máquina

Una turbina de vapor y otra de gas con la misma potencia de salida se tiene que el gasto másico de la turbina de vapor es tres veces menor que el de la turbina de gas. (Cengel & Boles, 2009)

2.3.3 Pérdidas de Vapor.

Siempre habrá algo de pérdidas de energía que se traducirán en uso adicional de vapor. En el arranque las líneas de distribución de vapor necesitan calentarse por lo que se experimentarán pérdidas. En operación normal existen pérdidas de calor hacia el ambiente, fugas y venteos ocasionales, debidos mayormente a operación inestable. (Rein, 2012)

2.3.4 Requerimientos de Vapor.

(Rein, 2012) La cantidad de vapor requerido está determinada por la presión de vapor, la presión de escape y la eficiencia de las turbinas. Pueden seleccionarse una cantidad de combinaciones de presión de caldera y eficiencia de turbinas para obtener el consumo de vapor específico requerido.

En una fábrica de azúcar hay tres presiones principales de vapor:

El vapor de alta presión, para la planta eléctrica.

El vapor de presión media, para los motores recíprocos.

El vapor de baja presión, para la elaboración.

2.3.5 Bombas Centrífugas

Una bomba centrífuga es una máquina que consiste de un conjunto de paletas rotatorias encerradas dentro de una caja o cárter, o una cubierta o coraza. Se denominan así porque la cota de presión que crean es ampliamente atribuible a la acción centrífuga. Las paletas imparten energía al fluido por la fuerza de esta misma acción. (Cengel & Boles, 2009)

2.3.6 Irreversibilidades.

Cualquier proceso que implique una transferencia espontánea de calor desde un cuerpo caliente a otro frío es irreversible. En caso contrario sería posible devolver esta energía del cuerpo frío al caliente sin producir otro efecto en los cuerpos implicados o en su entorno. En resumen, los procesos irreversibles incluyen una o más de las siguientes irreversibilidades

1. Transferencia de calor a través de una diferencia finita de temperaturas.
2. Expansión libre de un gas o líquido hasta una presión más baja.
3. Reacción química espontánea.
4. Mezcla espontánea de sustancias con diferente composición o estado.

5. Rozamiento tanto de deslizamiento como de viscosidad en el seno de un fluido.
6. Flujo de corriente eléctrica a través de una resistencia.
7. Magnetización o polarización con histéresis.
8. Deformación inelástica.

Aunque la lista anterior no es exhaustiva, si sugiere que todos los procesos reales son irreversibles. (Michael J. Moran y Howard N. Shapiro, 2004)

a) Proceso reversible.

(Michael J. Moran y Howard N. Shapiro, 2004)

Se dice que un proceso es *irreversible* si, una vez que el proceso ha tenido lugar, resulta imposible devolver al sistema y a todas las partes del entorno a sus respectivos estados iniciales.

b) Identificación de irreversibilidades.

Uno de los usos más importantes del segundo principio en ingeniería es el de determinar las mejores prestaciones teóricas de los sistemas. Comparando la prestación real con el óptimo teórico puede alcanzarse un mejor discernimiento de las posibilidades potenciales de mejora. Como puede suponerse, el mejor funcionamiento se analiza mediante procesos idealizados. En esta sección se presentan estos procesos y se distinguen de los procesos reales que suponen irreversibilidades. (Michael J. Moran y Howard N. Shapiro, 2004)

2.3.7 Exergía.

La exergía es el máximo trabajo teórico que puede obtenerse de la interacción mutua de dos sistemas distintos hasta alcanzar el equilibrio. (Michael J. Moran y Howard N. Shapiro, 2004).

a) Ambiente de referencia para la exergía.

El término ambiente se maneja en esta tesis para referirse a todo aquello no contenido en el sistema. (Michael J. Moran y Howard N. Shapiro, 2004)

b) Estado muerto.

El estado muerto, es cuando dos o más sistemas que interactúan con diferente cantidad de energía llegan a tener un punto de equilibrio en donde la cantidad de energía de los cuerpos están nivelados, Si el estado de una cantidad fija de materia, es diferente al del ambiente, existirá la posibilidad de producir trabajo. A este estado particular del sistema se le denomina *estado muerto*. (Michael J. Moran y Howard N. Shapiro, 2004)

2.3.8 Ciclo Rankine

(Cengel & Boles, 2009) La casi todas las plantas termoeléctricas utilizan el ciclo de vapor de Rankine, el ciclo ideal para los ciclos de potencia de vapor. En una planta de vapor, la energía química inherente al combustible primero se transforma para elevar la entalpía de los gases de combustión; esta entalpía se transfiere por convección y radiación al fluido de trabajo.

1 – 2 Compresión isentrópica en una bomba.

- 2 – 3 Adición de calor a presión constante en una caldera.
- 3 – 4 Expansión isentrópica en una turbina.
- 4 – 1 Rechazo de calor a presión constante en un condensador.

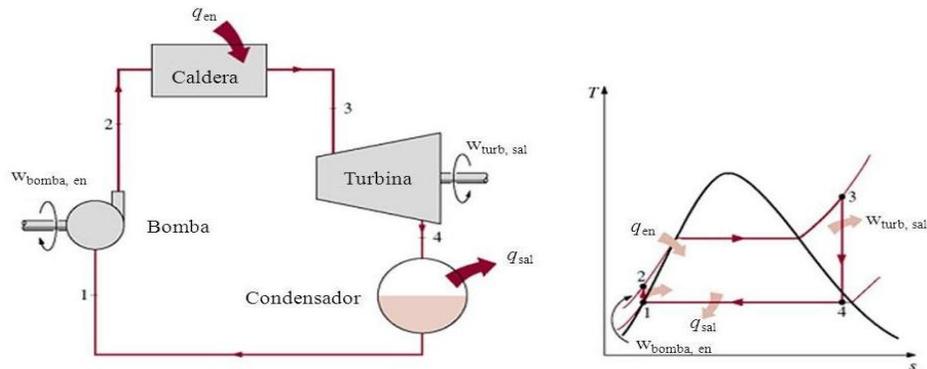


Figura 2. Ciclo rankine ideal

Fuente: Termodinámica Cengel y Boles, 2009.

a) Análisis de energía del ciclo Rankine ideal.

Los cuatro componentes asociados con el ciclo Rankine (la bomba, la caldera, la turbina y el condensador) son dispositivos de flujo estacionario, por lo tanto, los cuatro procesos que conforman el ciclo Rankine pueden ser analizados como procesos de flujo estacionario. La eficiencia térmica y el trabajo neto del ciclo Rankine. (Cengel & Boles, 2009)

b) ¿Cómo incrementar la eficiencia del ciclo Rankine?

Incrementar la temperatura promedio a la que el calor se transfiere al fluido de trabajo en la caldera, o disminuir la temperatura promedio a la que el calor se rechaza del fluido de trabajo en el condensador. Es decir, la temperatura promedio del fluido debe

ser lo más alta posible durante la adición de calor y lo más baja posible durante el rechazo de calor. (Cengel & Boles, 2009)

c) Sobrecalentamiento del vapor a altas temperatura

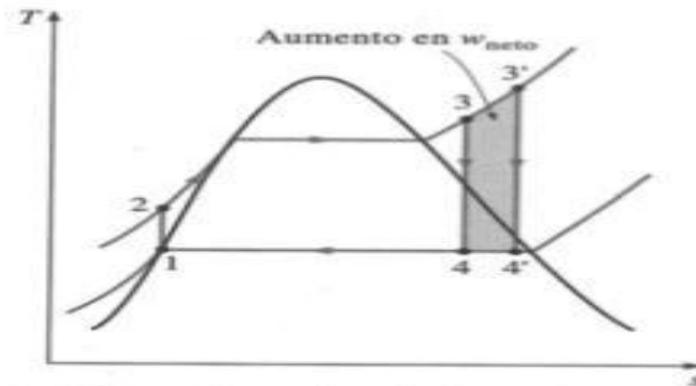
La temperatura promedio a la que el calor es transferido hacia el vapor puede ser incrementada sin aumentar la presión de la caldera, gracias al sobrecalentamiento del vapor a altas temperaturas. El efecto del sobrecalentamiento en el desempeño de los ciclos de potencia de vapor se ilustra en un diagrama T-s.

El área sombreada en este diagrama representa el aumento en el trabajo neto, mientras que el área total bajo la curva del proceso 3-3' representa el aumento en la entrada de calor. De este modo, tanto el trabajo neto como la entrada de calor aumentan como resultado del sobrecalentamiento del vapor a una temperatura más alta. Sin embargo, el efecto total es un incremento en la eficiencia térmica, porque aumenta la temperatura promedio a la cual se añade calor.

El sobrecalentamiento del vapor a temperaturas más altas tiene otro efecto muy conveniente: disminuye el contenido de humedad del vapor a la salida de la turbina, como se observa en el diagrama T-S (la calidad del estado 4' es más alta que la del estado 4).

Sin embargo, la temperatura a la que el vapor se sobrecalienta está limitada debido a consideraciones metalúrgicas. En la actualidad la temperatura de vapor más alta permisible en la entrada de la turbina es de aproximadamente 620 °C (1150 °F). Cualquier incremento en este valor depende del mejoramiento de los materiales actuales o del descubrimiento de otros nuevos que puedan soportar

temperaturas más altas. Las cerámicas son muy promisorias en este aspecto. (Cengel & Boles, 2009)



Fuente: Termodinámica Cengel y Boles, 2009.

Figura 2.2 Sobrecalentamiento del vapor a altas temperatura

d) Incremento de la presión de la caldera

Otra manera de incrementar la temperatura promedio durante el proceso de adición de calor es aumentar la presión de operación de la caldera, lo cual eleva automáticamente la temperatura a la que sucede la ebullición. Esto a su vez eleva la temperatura promedio a la cual se transfiere calor al vapor y de ese modo incrementa la eficiencia térmica del ciclo. (Cengel & Boles, 2009)

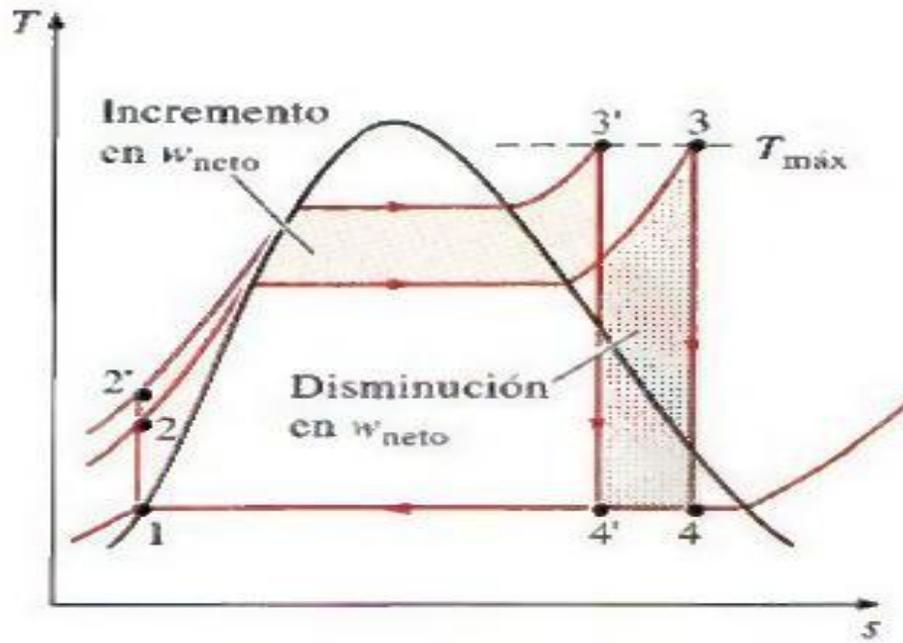


Figura 2.3 Incremento de la presión de la caldera.

Fuente: Termodinámica Cengel y Boles, 2009.

2.4 Definición De La Terminología.

2.4.1 Incremento.

Este término se utiliza para Cualquier aumento en el valor de un bien o servicio en un intervalo de tiempo. (www.google.com, Incremento)

2.4.2 Eficiencia Térmica.

La eficiencia energética es una práctica que tiene como objeto reducir el consumo de energía. Los usuarios industriales y comerciales pueden desear aumentar eficacia y maximizar así su beneficio. (www.google.com, Eficiencia Térmica)

2.4.3 Ciclos De Potencia.

Ciclos de Potencia de Vapor utiliza el vapor durante una parte del ciclo y en su forma líquida durante la otra parte del ciclo. Los ciclos termodinámicos se pueden clasificar también como ciclos cerrados y ciclos abiertos.

2.4.4 Método Exergético.

El método exergético, es relativamente una técnica basada en el concepto de exergía. Un análisis de exergía permite la valorización del consumo de recursos de energía a cada proceso o a una planta completa.

CAPITULO III.

3 MARCO METODOLÓGICO

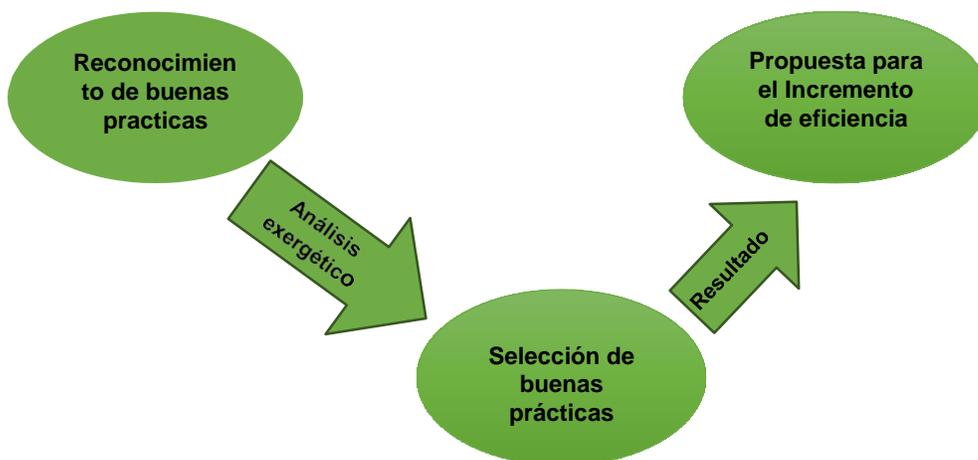
3.1 Tipo y diseño de la investigación

3.1.1 Tipo de investigación.

La investigación es Tecnológica cuasi experimental porque es una propuesta, desarrollada; además es de tipo *descriptiva correlacionar*, por lo que se describe hechos de una situación problemática que se intentará solucionar, y es de tipo Correlacional porque va a relacionar las características o variables de la presente investigación.

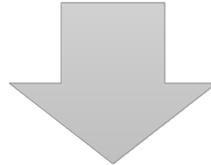
3.1.2 Diseño de la investigación.

El diseño de la investigación es cuantitativo ya que el proyecto se caracteriza por aplicar las investigaciones antes hechas por investigadores para resolver el problema de carácter práctico, empírico y tecnológico para el desarrollo de la investigación y en beneficio de la empresa azucarera Agroindustrial Pucalá.



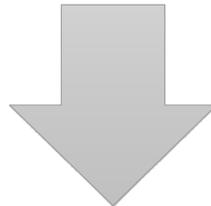
PROBLEMA.

Baja eficiencia energética del sistema de potencia de vapor



SOLUCIÓN.

Proponer buenas prácticas más adecuadas a la empresa para incrementar la eficiencia térmica del sistema de potencia de vapor



NUEVA REALIDAD.

Incremento de la eficiencia del ciclo de vapor a bajo costo para la empresa

3.2 Población y Muestra.

3.2.1 Población

Estará constituida por las todas las buenas prácticas que incrementen la eficiencia térmica de los ciclos de potencia de vapor.

3.2.2 Muestra

Se toma como muestra las prácticas relacionadas al mantenimiento preventivo que sean sencillas, aplicables y de bajo costo para el ciclo de potencia de vapor de la empresa Agroindustrial Pucalá.

3.3 Hipótesis.

Si se incrementa la frecuencia de mantenimiento preventivo y nivel de entrenamiento del personal técnico, se mejorará la eficiencia de la planta y el aprovechamiento de la exergía.

3.4 Variables.

3.4.1 Variable independiente

Frecuencia de mantenimiento preventivo a la planta de generación de vapor.

Nivel de entrenamiento del personal técnico.

3.4.2 Variable dependiente.

Exergía.

Eficiencia de la empresa Agroindustrial Pucalá S.A.A.

3.5 Operacionalización de variables.

Tabla 3.1 Operacionalización de Variables

VARIABLE	INDICADORES	SUB INDICADORES	INDICE	TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN	INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN	INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN
INDEPENDIENTE						
Frecuencia de mantenimiento preventivo de la planta de generación de vapor	Efectividad	Disponibilidad	Hrs/Día	observación	Registro de actividades	Excel
		utilización	Hrs/Día			
		confiabilidad	MTBF,MTTR (Hrs)			
	Seguridad	Índice de frecuencia bruta	Días/semana/meses/año		Guía de observación	pc
		Índice de frecuencia neta	Días/semana/meses/año			
Nivel de entrenamiento del personal técnico	Resultado de evaluación	Parámetros aprobatorios del resultado de evaluación	0 - 20	observación	Guía de observación	Entrevista
DEPENDIENTE						
Exergía	Eficiencia exergética	Exergía suministrada	Kj	Observación	Hoja de cálculo	Pc
Eficiencia de la empresa agroindustrial Pucalá	Eficiencia energética	Apreciamiento de energía	Kj	Observación	Hola de cálculo	pc

Fuente: Propia.

3.6 Métodos, técnicas e instrumentos de recolección de datos.

A) Método de recolección de datos.

i. Analítico.

Este método ayuda en gran escala al desarrollo de este proyecto porque mediante este se analizará los resultados de la investigación para luego organizar esa información, usarla con criterio en la interpretación de los resultados obtenidos.

ii. Sintético.

Este método nos ayuda a descartar información obsoleta que no tiene relevancia con el proyecto y solo tomar referencia de las investigaciones recientes.

iii. Inductivo.

Con este método se obtuvo las conclusiones y a la vez realizar juicios críticos para la detección de pérdida de energía.

iv. Deductivo.

Este método permite la presunción de hipótesis, investigación de leyes físicas y demostraciones matemáticas.

B) Técnicas de recolección de datos.

i. Observación.

En la investigación del proyecto se realiza observaciones en el funcionamiento y del método de operar de los técnicos e

ingenieros de la planta de la empresa Agroindustrial Pucalá S.A.A.

ii. Entrevista.

Se desarrollará una entrevista al ingeniero de planta de generación de energía de la empresa a Agroindustrial Pucalá S.A.A que es donde se encuentra el ciclo de potencia de vapor donde se hará el estudio del proyecto.

iii. Análisis de documentos.

Se tendrá en cuenta la información de manuales, libros, revistas y tesis concernientes con el tema de investigación.

C) Instrumentos de recolección de datos.

i. Guía de análisis de documentos.

Se revisará normas técnicas para el análisis exergético dadas por ASME (Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos), teniendo en cuenta las recomendaciones y reglas impuestas por esta norma.

También se revisa libros con el tema de exergía, exergía, balances térmicos y otros.

ii. Descripción de los instrumentos utilizados

Los datos de temperatura y presión se realizan tomando en cuenta la sensibilidad de los instrumentos utilizados (equipos calibrados) y en un momento que la demanda de vapor es promedio.

- **Termómetro**

Un termómetro es un aparato que nos ayuda a medir la temperatura. Los más populares constan de un bulbo de vidrio que incluye un pequeño tubo capilar.
(www.google.com)

Los datos sé que se tomaran en cuenta de las operaciones de las máquinas del área de caldera, entre los días de 24 de agosto hasta 23 de noviembre.

Cada caldera cuenta con un termómetro (unidades Celsius y Fahrenheit)

- **Manómetros**

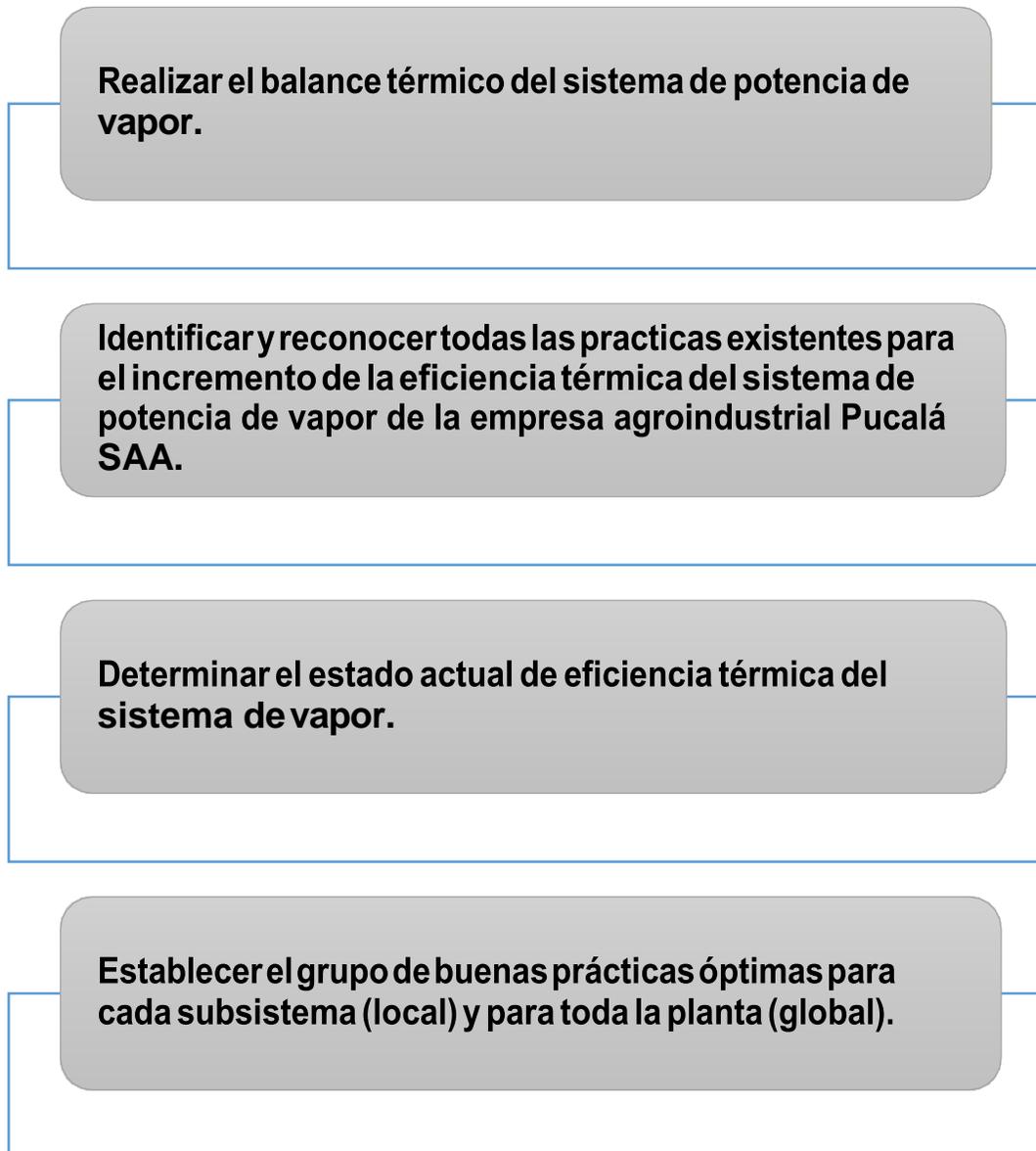
El manómetro es un aparato usado para la medición de la presión en los fluidos, generalmente estableciendo la diferencia de la presión entre el fluido y la presión local.
(www.google.com).

- **Pirómetro.**

El pirómetro es un instrumento para medir temperaturas muy elevadas. Se basa en el calor a la radiación visible emitida por los objetos calientes, y mide el calor de la radiación mediante un par térmico o la luminosidad de la radiación visible (www.google.com).

3.7 Procedimiento para la recolección de datos.

3.7.1 Diagrama de flujo de procesos:



3.7.2 Descripción de procesos.

A) Realizar el balance térmico del sistema de potencia de vapor

Para realizar el balance térmico del ciclo de potencia de vapor se tiene que registrar los datos con los que la empresa trabaja, estos datos son de entrada y salida de los equipos (calderas, turbinas y bombas) los cuales se utilizan para hacer los cálculos de eficiencia térmica de cada equipo y del sistema de potencia de vapor.

Los datos obtenidos en la planta de generación se remplazarán en las siguientes formulas.

I. Caldera.

1) Cálculo de Eficiencia

Para determinar la eficiencia de cada caldera, se empleará el método indirecto que se expresa en la siguiente fórmula:

$$\eta_{\text{Caldera}} = 100 - \sum \text{pérdidas} \quad (\%)$$

Se necesita saber la composición del combustible, en este caso es el bagazo y se muestra en la siguiente tabla.

2) Composición Química del Bagazo

La constitución química del bagazo cambia de un país a otro, así como también en una misma lugar, cuando procede de una u otra diversidad de caña. Los autores en trabajos de una azucarera muestran varios estudios completos de los cuales se presenta a continuación:

Tabla 3.2 Composición química del bagazo

Composición Química del Bagazo				
Autor	C %	H ₂ %	O ₂ %	Cenizas %
Spencer	46.50	6.50	46.00	-----
Kelly	48.48	6.20	44.32	-----
Geerlings	48.45	6.20	45.53	-----
Tromp	45.60	6.00	47.00	2.00
Liptack	45.00	6.00	47.00	2.00
L. Ferrer	49.80	6.05	41.30	1.80

Fuente: ing Jesus Acosta Cueto M. EN C

Existe mucha variación en el poder calorífico del bagazo según provenga de diversos lugares.

El poder calorífico, de acuerdo con la fórmula de Dulong, resulta: 7688 BTU por libra.

El manual para azucareros de Spencer recomienda que se tomen 8350 BTU/libra de bagazo seco externo de cenizas.

3) Para calcular la pérdida de calor en una caldera bagacera.

Puede considerarse que las pérdidas de calor en una caldera de bagazo son las siguientes:

4) Pérdida debida a la humedad del bagazo.

Esta pérdida es de gran importancia y depende esencialmente del contenido de humedad del bagazo y de la temperatura de salida de los gases de la chimenea.

Para el cálculo de estas pérdidas se puede hacer consideración de que el agua del bagazo se calienta hasta 100 °C (212 °F), se evapora y posteriormente se calienta hasta la temperatura de

salida de los gases de la chimenea. Considerando el 50 % de humedad del bagazo.

Suponiendo que el agua del bagazo tiene una temperatura de 30 °C (86 °F), la pérdida se puede calcular de la siguiente fórmula:

$$Q = W (T_a - T_b) + 970.3 * W + W * C_p (T_2 - T_a)$$

Donde:

W = Peso de agua en libras, en este caso W = 1
 T₂ = Temperatura de salida de gases de la chimenea.
 C_p = Calor específico medio del vapor de agua entre T_a y T₂.

Como: W = 1 libra, Q nos dará la pérdida por humedad en el bagazo por libra de bagazo quemado.

El calor específico “instantáneo” de los gases está dado por las ecuaciones empíricas del tipo:

$$C_p = a + bT + cT^2$$

En consecuencia, para obtener los calores específicos medios, que son los que deben emplearse, hacemos una integración:

C_p = Calor específico medio.

$$C_p = \int_{T_1}^{T_2} \frac{C_p(T) dT}{T_2 - T_1}$$

$$C_p = \int_{T_1}^{T_2} (a + bT + cT^2) dT / (T_2 - T_1)$$

$$C_p = a + \frac{b}{2} (T_2 + T_1) + \frac{c}{3} (T_2^2 + T_2 T_1 + T_1^2)$$

Donde:

T_2 = Temperatura final en K

T_a = Temperatura inicial en K (Temperatura base)

a, b, c = Constantes peculiares de cada gas.

Para nuestro caso tomaremos:

$T_a = 212 \text{ °F} = 100 \text{ °C} = 373 \text{ K}$

Para el vapor de agua los valores de las constantes son:

$A = 6.89.$

$b \times 10^3 = 3.283$

$c \times 10^6 = 0.343$

La expresión anterior nos da los calores específicos medios molares.

Dividiendo entre 18 (peso molecular del agua), encontraremos los calores específicos medios por libra de vapor de agua.

5) Pérdida por hidrógeno

Esta pérdida del contenido de hidrógeno del bagazo y de la temperatura de salida de los gases de la chimenea. El cálculo es análogo al de la pérdida por humedad de bagazo. Se puede considerar que el agua producida en la combustión del bagazo se forma a 86 °F (30 °C), se calienta hasta 212 °F (100 °C), se evapora y finalmente sube de temperatura hasta alcanzar la de los gases de la chimenea. Esta consideración es lo suficientemente exacta para propósitos prácticos. En consecuencia, podemos emplear la misma fórmula que

anotamos antes para el cálculo de las pérdidas por humedad de bagazo.

Para ello necesitamos calcular el valor W (peso del agua formada por la combustión del hidrógeno en libras).

Por cada libra de bagazo seco quemado tenemos 0.0604 libras de hidrógeno. Como por cada libra de H_2 se pueden obtener 9 libras de agua, la cantidad de agua W será $= 9 \cdot 0.0604 = 0.5436$ libras.

6) Pérdida de humedad en el aire

Esta pérdida es proporcional al contenido de humedad y a la cantidad de aire que se emplea. Depende además de la temperatura de salida de gases de la chimenea. Para una determinada cantidad de aire, se llega a un máximo cuando el aire está saturado de humedad.

En las gráficas de humedad de aire encontramos que $86^\circ F$ ($30^\circ C$) y 100 % de saturación, el contenido de agua es:

$$H = 0.026 \text{ libras de agua / libra de aire seco}$$

Sabíamos ya que por libra de bagazo seco quemado se necesitan 5.915 libras de aire para 0% exceso de aire. Por tanto, la cantidad de aire seco a 27 % de exceso de aire es:
 $5.915 \cdot 1.27 = 7.51$ lb.

La cantidad de agua en el aire es: $7.51 \cdot 0.026 = 0.195$ lb.

El agua que lleva el aire entra como vapor, en consecuencia, la pérdida puede calcularse mediante:

$$Q = W \cdot C_p (T_2 - T_b)$$

Donde:

Q = Pérdida de calor por humedad en el aire.

W = 0.195 de agua.

T₂ = Temperatura de salida de gases de la chimenea.

T_b = Temperatura de entrada del aire.

Necesitamos obtener calores específicos medios:

C_p = calor específico medio.

$$C_p = a + \frac{b}{2} (T_2 + T_b) + \frac{c}{3} (T_2^2 + T_2 T_b + T_b^2)$$

Donde:

$$T_b = 86 \text{ °F} = 30 \text{ °C} = 303.15 \text{ K}$$

7) Pérdida por gases secos

Constituye una de las pérdidas de mayor consideración.

Esta pérdida depende de la composición del bagazo, del exceso de aire empleado, de las condiciones de combustión que influye sobre la composición de los gases y de la temperatura de salida de éstos.

La pérdida de calor para el porcentaje (%) de CO₂ puede calcularse mediante la fórmula:

$$Q = n \cdot C_p (T_2 - T_b)$$

Donde:

Q = Calor perdido en el gas, en BTU por lb de bagazo seco quemado.

n = Número de moléculas libras gas.

T₂ = Temperatura de salida de los gases de chimenea.

Por cada temperatura de salida de los gases de la chimenea y

cada %CO₂ es necesario aplicar la fórmula anterior, para cada

gas de los que intervienen en la composición de los gases secos. En consecuencia, necesitamos saber los calores específicos medios. Las constantes son las siguientes:

Tabla 3.3 Constantes de calores específicos

	A	B	C
H ₂ O	6.89	3.283 X10 ⁻³	0.343X10 ⁻⁶
CO ₂	6,85	8.533	-2.475
N ₂	6.3	1.819	-0.345
O ₂	6.13	2.99	-0.806

Fuente: ing Jesus Acosta Cueto M. EN C

8) Pérdida por combustión incompleta del bagazo

Estas serán difíciles de calcular, conociendo la porción de bagazo que no se quema. Estas pérdidas son casi insignificante y se puede despreciarse.

9) Pérdida por purga en las calderas

Esta pérdida no debe ser de gran consideración. Depende de las características del agua de alimentación, del tipo de tratamiento de éstas y de la presión de operación de la caldera. Con buenas condiciones de agua de alimentación y un control estricto del tratamiento, esta pérdida no debe pasar de 1 o 2% del poder calorífico del bagazo seco, su cálculo es sencillo.

Cantidad de agua purgada = agua de alimentación – vapor generado.

Mediante la siguiente fórmula se puede calcular la pérdida:

$$Q = P (T_3 - T_c)$$

Donde:

P = Cantidad de agua en libras (lb).

T₃ = Temperatura de ebullición del agua de la caldera.

T_c = Temperatura del agua de alimentación.

10) Pérdidas indeterminadas

Obviamente no son calculables en forma directa, y solo se pueden determinar por diferencia entre el calor suministrado y por el bagazo y las pérdidas que ya se ha mencionado anteriormente, más la correspondiente a radiación. No obstante, se puede desestimar. Los fabricantes de calderas dan como dato práctico un calor perdido por este concepto que representa el 1.5 % del poder calorífico del combustible.

11) Pérdida por radiación

Estas pérdidas son de complicación relativa en virtud de las características de las calderas como equipos de transmisión de calor.

Además, la obtención de datos para su cálculo es bastante imprecisa por los medios de que normalmente se dispone. Bajo las condiciones usuales de operación no pasan de 4% sobre el poder calorífico del combustible y siendo normalmente del orden 2%.

La eficiencia de la caldera es la diferencia entre 100 y la suma de las pérdidas. Conviene utilizar para la composición de bagazo quemado un análisis promedio obtenido por diversas determinaciones, durante el periodo de zafra mientras más representativo sea el análisis, más exacta será la determinación de las pérdidas de calor.

Es evidente que el elemento más crítico en la eficiencia de una caldera es el porcentaje de humedad residual de bagazo, a

mayor humedad requiere mayor exceso de aire y una reducción en %CO₂ con aumento de volumen en los gases.

II. Para calcular el balance exergético el ciclo del vapor

Para evaluar la eficiencia de segunda ley de la termodinámica en la caldera, el método más empleado es el de entradas y salidas como datos para hallar las entalpías y entropías

Fórmulas para hacer el balance exergético.

- Calor absorbido por el vapor en la caldera

$$Q_1 = \sum_{out} \dot{m}_i (h_i - h_0) - \sum_{in} \dot{m}_j (h_j - h_0)$$

- Masa de vapor por kg_{fuel}

$$\dot{m}_v = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_f - \dot{m}_a}$$

- Exergía en los distintos puntos de la instalación

$$\dot{E}_x = [(h - h_0) - T_0(s - s_0)] \dot{m}$$

- Exergía de la combustión.

$$\dot{E}_{x,comb} = \dot{m}_f \left(1 - \frac{T_0}{T} \right)$$

- Exergía (perdidas de calor) en las calderas = Q₁ – perdidas en la caldera.

- Trabajo en la turbina.

$$\dot{m}_v (h_4 - h_5)$$

- Exergía del calor cedido al condensador.

$$\dot{Q}_2 = \dot{Q}_3 (h_5 - h_1)$$

- Exergía perdida en la caldera = $\dot{Q}_2 - \dot{Q}_3 + \dot{Q}_{\text{perdida}}$
- Perdida de exergía en combustión en la caldera = exergía perdida en la caldera – exergía (perdida de calor) en las caldera.
- Perdida de exergía en las tuberías = $\dot{Q}_3 - \dot{Q}_4$
- Perdida de exergía en la turbina = $\dot{Q}_4 - \dot{Q}_5$
- Rendimiento exergético

$$\eta_{\text{ex}} = \frac{\dot{Q}_{\text{exergía útil}}}{\dot{Q}_{\text{exergía disponible}}}$$

B) Identificar y reconocer todas las practicas existentes para el incremento de la eficiencia térmica del sistema de potencia de vapor de la empresa Agroindustrial Pucalá SAA.

i. Prácticas Generales.

Poniendo en marcha los programas que veremos enseguida, el Departamento de Mantenimiento obtendrá resultados a mediano y largo plazo. A través del uso de las Mejores Prácticas, y con el uso de métodos de especialización, la reducción del costo estará dentro de la posibilidad de 20% a 35%. Si los gerentes de

empresa complementan estas prácticas experimentarán beneficios, la ganancia será de importancia en el desempeño de la producción de la empresa y así conseguirán incrementar la eficiencia de la empresa. ¿Cuánto éxito? obedecerá a lo bien que cada función y cada actividad especificada se integre en el mantenimiento de la planta y la rutina de trabajo de producción. Las facetas básicas en las Mejores Prácticas en Mantenimiento y ellas habrán un impacto positivo en la organización.

1) Los Cambios de ideología del personal.

La manera de pensar de los trabajadores de una empresa (operarios, ingenieros) sobre la manera que los del manejo de sus actividades diarias. Como, por ejemplo

1. No involucrar los problemas personales a la hora del trabajo.
2. Mantener siempre limpia el área de trabajo de cada operario, obrero e ingeniero.
3. Buena interacción entre los ingenieros, operarios y obreros.
4. Hacer pensar que las ganancias que se genera en la empresa es ganancia también para los trabajadores mediante incentivación en el área laboral.

Si es te tipo de prácticas el período de permutación no puede mantener. La empresa se atrasará y regresará a sus prácticas antiguas.

2) El Cambio Comprensivo.

Muchas personas le tienen miedo al cambio. Es necesario que todos entendamos la importancia y descubramos el beneficio de hacer las correcciones necesarias. Sólo atreves cambios podemos esperar conseguir el verdadero éxito. A medida que el mantenimiento de las áreas de producción de vapor tome la decisión de mejorar el nivel de eficiencia del ciclo de potencia de vapor, deben estar deseosos de desarrollar dentro de ellos un plan favorablemente disciplinado y comprometido de acción.

3) El trabajo en equipo.

El personal de la planta: tano el operativos como el de apoyo deben saber del plan de trabajo y su efecto positivo en cada individuo de la coordinación y del trabajo en equipo y los beneficios que conlleva trabajar apoyándose los unos a los otros en el trabajo de los beneficios de trabajar en confianza con los compañeros para evitar los accidentes o almenos reducir en gran cantidad los índices de accidentes. El trabajo en equipo en los centros de trabajo aumenta la productividad ya que la labor que desempeña cada trabajador lo realizara con mejor actitud lo cual lleva al aumento de producción y calidad de trabajo

4) Entrenamiento y capacitación.

Con un entrenamiento centrado en las buenas prácticas para mejor desempeño de los trabajadores debe realizarse tratando los temas centraos a cada tipo de trabajo que realizan los

trabajadores, proponer cambios y resaltar las buenas prácticas que ya se vienen realizando. Muchas sesiones de entrenamiento se necesitan para ver un avance en producción de la planta. Presentar métodos básicos para que el personal los entienda con facilidad. Las sesiones deben limitarse a una hora cada día y deben cubrirse todos los aspectos del nuevo plan.

El personal necesita ser entrenado y capacitado para los muchos problemas y así cuando se presente problema en sus labores su metodología para solucionar el problema sea la más adecuada y sin necesidad de llevar a una parada general de la empresa.

ii. Prácticas particulares

1. Calderas

- a) Buena operación (operadores de alimentación de bagazo y agua).
- b) Lograr un Overhaul en las calderas, lo cual generaría una buena inversión.
- c) Mantenimiento periódico a cada 20 días de operación donde se repara la estructura refractaria, donde se extrae el hollín de los tambores de lodo, tuberías (fuga de agua), ventiladores de tiro inducido y forzado, limpiar los tubos de los pre-calentadores de aire.
- d) Mantenimiento anual que dura un mes donde se realiza una inspección más intensiva, se cambian las tuberías de agua de vapor y del calentador de aire, reparación total de la estructura refractaria de los hornos.

- e) Operación de alimentación de agua, se trata de mantener el control del agua siempre en la mitad de la altura del domo (se hace de forma manual) con la finalidad de evitar calentamiento dentro de las tuberías y domos de la caldera.
- f) El tratamiento del control del agua. Se sigue las recomendaciones y pautas dadas por la empresa IPESA para mantener sus niveles dentro de los parámetros establecidos en conductividad, dureza, PH, sulfitos y fosfatos, con la finalidad de evitar corrosión y calichamiento de las tuberías internas.
- g) Llevando un control de purgas de lodos de manera adecuada.
- h) La combustión del bagazo dentro de los hornos se mantiene a una temperatura de llama de combustión de 800 a 900 °C y manteniendo un exceso de aire de 27%.
- i) El ingreso de agua a la caldera mantiene una temperatura de ingreso de 95 a 100 °C con una salida de vapor sobrecalentado a 338°C y una presión de trabajo de 400 PSI.
- j) Inspeccionar y revisar que las válvulas de seguridad estén activas y operativas con la finalidad de dar la tranquilidad de seguridad al operador.
- k) limpieza en las superficies de los tubos, interna y externamente. El registro de temperaturas de los diferentes pasos de gas ayuda a detectar condiciones de limpieza para óptimas eficiencias. Los coeficientes globales de transferencia de calor se ven disminuidos por la presencia de incrustaciones y depósitos.

- l) Regular el tiro del hogar a un nivel bajo que garantice la evacuación de los gases, que apenas contrarreste las caídas de presión a través de la caldera y que de mejor resistencia del calor en todas las superficies de intercambio.
- m) Procurar una combustión eficiente, manteniendo los quemadores bien ajustados para una relación constante aire combustible.
- n) Procurar siempre el buen estado y calibración de los pulverizadores, atomizadores, parillas, etc.
- o) Trabajar con combustibles cuyas características sean conocidas y controladas.
- p) Mantener buen sello en la caldera para evitar infiltraciones de aire que aumenten los excesos de aire.
- q) Hacer un buen control interno y externo del agua de la caldera y de las purgas, para evitar incrustaciones.
- r) Se pueden aprovechar el calor en los gases para precalentar el agua de alimentación y/o el aire de combustión. Se debe evitar

2. Turbinas.

- a) Asegurar el momento de encendido, siguiendo las indicaciones y pautas del manual de manera estricta y ordenada (Purgar las tuberías, calentar de 40 a 60 min, gradualmente el regulador de velocidad se pone en marcha a cero y se le va ingresando el vapor lentamente, se abre la válvula de vapor, se verifica sus niveles de agua de refrigeración y sus niveles de aceite, su presión y temperatura dentro del rango de la turbina).

- b) Se pone en marcha a la turbina con el regulador de velocidad hasta alcanzar su velocidad de trabajo que corresponda, verificando siempre que estén las vibraciones a 4.5 y de la misma manera se hace para el apagado siguiendo las indicaciones y pautas del manual.
- c) Se debe tener su dispositivo de disparo de sobre velocidad operativo y activo en caso de existir un embalamiento de la turbina.
- d) Asegurar siempre que el vapor que entre a la turbina sea siempre limpio, libre de sacarosa ya que el vapor con mezcla afecta los alabes de la turbina.
- e) Los cojinetes y chumaceras de apoyo siempre deben estar alineados.
- f) Los dispositivos del regulador de velocidad deben estar siempre aceptables y lubricados, porque el regulador es el control de operación de la turbina. Fallando este equipo puede embalsarse la turbina.

3. Evaporadores

- a) Buena Operación de los equipos (responsabilidad y cuidado).
- b) Sus niveles de jugo, de vapor y agua, teniendo mucho cuidado con las presiones de trabajo de vapor.
- c) Mantenimiento cada 15 días que consiste en hervir soda para descalcificar las incrustaciones que se dan durante las operaciones de molienda.

- d) Se mantiene un brix de 65% para evitar que entre sacarosa en los condensados del gua de deposición que va a las calderas.
- e) Anualmente se realiza cambio de tuberías y placas que presenten desgaste y corrosión para evitar filtración de sacarosa en el agua del condensado del agua en la deposición que va a las calderas.
- f) Válvulas de seguridad que estén activas y operativas.
- g) Válvulas de operación deben estar herméticamente sellado.
- h) Agregar automatización.

4. Bombas

- A. Tratar que no jale aire.
- B. Que el fluido sea agua y no tenga mezcla.
- C. Que el motor que los acciona este energizado.
- D. En el momento de operación de la bomba se verifica que sus niveles de aceite estén en el nivel establecido.
- E. Vibraciones por debajo de 4.5 m/s.
- F. Debe tener una operación de trabajo de 500 PSI.
- G. Mantenimiento periódico de 15 a 20 días donde se revisa rodamientos, empaquetaduras para evitar la salida del agua, impulsores, alineamiento, motor bomba, deflexión del eje de la bomba.
- H. hacer un Overhoul a los motores cuando sea necesario.

iii. Determinar el estado actual de eficiencia térmica del sistema de vapor.

Para determinar cuál es el estado actual de eficiencia de la empresa se tiene que realizar los cálculos exergéticos con los datos obtenidos de las mediciones hechas en la empresa y valiéndose del desarrollo de las formulas planteadas obtendremos los valores reales de la eficiencia en la que se encuentra la planta de vapor, aplicando como técnica la observación y el análisis de documentos. Estos resultados se ven en el capítulo V de la investigación.

iv. Establecer el grupo de buenas prácticas óptimas para cada subsistema (local) y para toda la planta (global).

Una vez obtenidas todas las buenas prácticas que se pueden realizar para el incremento de la eficiencia, ahora solo estableceremos un grupo de ellas que son las que cumplen con las restricciones de sencillez, aplicabilidad, y bajo costo, aplicando como técnica el análisis de documentos estas buenas practicas se verán en el capítulo V.

C) Equipos, materiales e instrumentos que ayudan en la investigación.

Tabla 3.4 Equipos y materiales para la recolección de datos

ITEM	DESCRIPCIÓN
Equipo	EPP
Materiales	computadora Cable USB calculadora Cuaderno de notas Lapiceros
Instrumentos	Termómetro Manómetro Pirómetro

Fuente: Propia

D) Recursos humanos.

Tabla 3.5 Recursos humanos

PERSONAL	NUMERO
Ingeniero mecánico Eléctrico	1
Técnico de recolección de datos	2

Fuente: Propia.

E) Normativa.

Para este tipo de investigación se tendrá en cuenta la Norma Técnica Peruana NTP 350.301.

- Calderas industriales.

Estándares de eficiencia térmica (Combustible/vapor) y etiquetado.

Esta Norma Técnica Peruana establece los estándares de eficiencia térmica (combustible/vapor) que deberán cumplir las calderas industriales sin equipo de recuperación de calor y las características del etiquetado.

- **Referencias normativas.**

Las siguientes normas contienen disposiciones que, al ser citadas en este texto, forman parte de esta Norma Técnica Peruana. Las ediciones indicadas estaban en vigencia en el momento de esta publicación. Como toda Norma está sujeta a revisión, se recomienda a aquellos que realicen acuerdos basándose en ellas, que analicen la conveniencia de usar las ediciones recientes de las normas citadas seguidamente. El Organismo Peruano de Normalización posee, en todo momento, la información de las Normas Técnicas Peruanas en vigencia.

- **Norma Técnicas Peruanas**

NTP 350.301.2004 CALDERAS INDUSTRIALES. Estándares de eficiencia térmica

- **Campo de aplicación**

Esta Norma Técnica Peruana se aplica a las calderas tipos paquete de tubos de humo (Pirocubular) y de tubos de agua (acuotubular) sin equipo de recuperación de calor que utilizan combustibles sólidos, gaseosos y líquidos derivados del petróleo, con las características mostradas

Tabla 3.6 Características de las calderas a las que se aplica esta NTP

Potencia	De 98 – 11 772 kW (10 a 1 200 BHP)
Presión manométrica	-Hasta 2 069 kPa (300 psig) para las calderas de tubos de humo - Hasta 3 103 kPa (450 psig) para las calderas de tubos de agua.
Temperatura	De saturación

Fuente: Propia

F) Vida útil:

Es el tiempo durante el cual la caldera mantiene su eficiencia de trabajo, su presión para la cual fue fabricada y los parámetros de seguridad y diseño. El período de vida útil aceptado internacionalmente es de 20 años.

G) Estándares de eficiencia térmica (combustible/vapor)

Los estándares de eficiencia térmica (combustible/vapor) para las calderas descritas por la NTP 350.300, se han clasificado de acuerdo a las siguientes categorías mostradas en la Tabla

Tabla 3.7 Rangos y categorías de eficiencia térmica (combustible/vapor) para calderas de vapor saturado

CATEGORÍA	RANGO DE EFICIENCIA TÉRMICA (η)
A	Mayor de 82 %
B	$80 < \eta \leq 82$ %
C	$78 < \eta \leq 80$ %

Fuente: Propia

El fabricante garantizará la eficiencia térmica (combustible/vapor) indicada en la Tabla siguiente cualesquiera sean las condiciones geográficas y climáticas de la zona en que operará la caldera.

H) Planos.

Se observará los planos de la planta de sistema de potencia de vapor de la empresa Agroindustrial Pucalá en donde se verá la distribución de cada uno de las máquinas que trabajan en el ciclo de vapor.

3.8 Análisis estadístico de datos e interpretación de datos.

a) Enfoque cuantitativo.

Se utilizará la estadística descriptiva. Ya que se recolectará datos anteriores tomados en la empresa luego analizarlos matemáticamente y compararlos con los resultados obtenidos en la investigación.

b) Enfoque cualitativo.

Se realizará mediciones en el campo con instrumentos (analógicos y digitales) para obtención de datos, utilizando la guía de observación y también realizando entrevistas para determinar las principales pérdidas que ocurren en el ciclo de potencia de vapor.

3.9 Principios éticos.

Para el desarrollo del proyecto se ha considerado como criterio el código deontológico del CIP (colegio de ingenieros del Perú).

Según el cual, la relación con la sociedad artículo 98, los ingenieros reconocerán que la seguridad de la vida, la salud, los bienes y el bienestar de la población y del público en general, así como el desarrollo tecnológico del país depende de los juicios, decisiones incorporadas a ellos o por su consejo, en el dispositivo, edificación, estructura, maquinaria, producto, proceso. Por ninguna razón pondrán sus conocimientos al servicio de todo aquello que afecte la paz y la salud.

3.10 Criterios de rigor científico.

a) Validez.

Esta es una de las principales cualidades de nuestro proyecto, que debe tener la interpretación correcta de los resultados obtenidos durante el proceso de la obtención de datos y de su análisis, para que garanticen los mejores resultados que se representan además de ser merecedores de crédito y confianza.

b) Fiabilidad.

Para el desarrollo del proyecto se recolecta la información, teorías de análisis exergéticos y energéticos que tengan relación con el tema tratado en el proyecto de investigación.

c) Credibilidad.

Los resultados del análisis se realizarán teniendo como referencia a las formulas y análisis de investigaciones antes estudiadas y probadas.

d) Transferibilidad.

El proyecto investigado se desarrollará partiendo de la investigación científica para después aplicarlo en la práctica.

CAPITULO IV

4 RESULTADOS EN TABLAS Y GRÁFICOS.

4.1 Impacto de las buenas practicas sobre la eficiencia térmica

El impacto que tiene la aplicación de buenas prácticas en el ingenio azucarero Pucalá es el incremento de la eficiencia térmica del sistema de potencia de vapor, sin invertir mucho en ello lo cual es algo positivo para la empresa.

4.1.1 Balance térmico

A. Balance térmico de las calderas

- i. **Inspección visual de las calderas para determinar su estado actual**
 - Lo principal es que no toda las tuberías de agua de alimentación tienen aislante térmico.
 - En la parte interna los tubos ya están desgastados y se encuentran entre un 15 a 25 % taponeados por el caliche que se forma dentro de ellos.
 - Los ladrillos refractarios ya están muy deteriorados.
 - Fuga de calor a través de sus puertas donde se retira el bagazo quemado.

Para la inspección visual se ha hecho una lista de chequeo que se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 4.1 Chequeo de la caldera.

MATERIAS	Si	No
1.- ¿Generador de Vapor está en funcionamiento?		
Placa característica legible Presión de diseño , Presión de trabajo y Año		X
Tipo de combustible GN y petróleo, diésel, Otro (Bagazo)	X	
Respecto al uso del vapor Autoclaves Intercambiador de calor por otros	X	
2.- Libro de Vida. Está a la vista con registro de mantenciones,		X
3. - Operadores de Calderas.	X	
a.- Personal que opera las calderas acredita Certificadode Competencia		X
b.- Existe personal operador de caldera suficiente (considerando turnos y equipos) Indique horas de funcionamiento al	X	
c.- Los operadores cuentan con elementos de protección personal : calzado de seguridad,	X	
d.- Los operadores de calderas están bajo control audiométrico	X	
4.- Requisitos de Sala de Caldera Sólo para calderas cuya superficie de calefacción es superior a 5 m ² y presión de trabajo sobre		
a.- Construcción de material incombustible.	X	
b.- Iluminación suficiente y en buen estado	X	
c.- Sala cuenta con ventilación externa	X	
d.- Distancia mínima entre caldera y muros, caldera y equipos es de 1 m	X	
e.- Existe amplitud suficiente para operar en forma segura (Para condiciones normales de trabajo, mantenciones,revisiones e inspecciones)	X	

f.- La Sala tiene dos puertas. (abren hacia fuera, tienen direcciones diferentes y libre de obstáculos)	x
g.- La Sala de Calderas tiene Servicio Higiénico para los operadores, o bien cercano a su lugar de trabajo	x
h.- La Sala se encuentra limpia y ordenada	x
5.- Condiciones de Seguridad de la instalación de la caldera	
a.- Estanque de alimentación de combustible líquido a quemador cuenta con pretil de retención y tubo de venteo hacia el exterior	x
b.- El estado de la cubierta metálica de la caldera es bueno, y no presenta evidencias de oxidación por infiltraciones de agua ni bordes	x
c.- Las líneas de suministro de vapor que están al alcance del operador en labores habituales, así También en reparaciones, revisiones y/o mantenimientos. Están provistas de aislamiento térmica para evitar contacto con superficies calientes	x
d.- El operador tiene acceso seguro y expedito a dispositivos de mando y accesorios en altura (válvula de suministro, manifold, válvulas de seguridad, etc)	x
e.- Instalación cuenta con equipo de extinción de incendios	x
f.- La purga de agua de la caldera proviene del punto más bajo de la caldera destinado a la extracción de lodos y purga de fondo de la misma, las que van a dar a un estanque de purga. Las llaves se encuentran operativas y no constituyen un riesgo para el operador.	x
g.- La caldera tiene tapas de inspecciones o portezuelas ubicadas en lugares adecuados para permitir acceso al interior y realizar revisión y limpieza de ductos.	x
h.- El agua de alimentación a la caldera está dotada de una válvula de retención cerca de la caldera y una válvula de paso entre la caldera y la válvula de retención	x

i.- El suministro de agua tiene a lo menos dos bombas, una en stand-by	x
j.- El agua de alimentación tiene tratamiento químico para reducir durezas, impurezas y controlar el pH	X
k.- Existe laboratorio externo que verifica la calidad del agua	X

Fuente: Propia

ii. Mediciones en la caldera (para cálculo reales)

Se tomaron medidas en la entrada y la salida de la caldera las cuales se muestran en las siguientes Tabla

Tabla 4.2 *Datos (presión y temperatura) de la caldera 1*

Corrientes	T (°F)	P (psi)	Flujo de vapor (Lb/h)
Entrada de la Caldera	212	500	
Salida de la Caldera	644	350	27919.363

Fuente: Empresa Agroindustrial Pucalá S.A.A

Tabla 4.3 *Datos (presión y temperatura) de la caldera 2*

Corrientes	T (°F)	P (psi)	Flujo de vapor (Lb/h)
Entrada de la Caldera	212	500	
Salida de la Caldera	419	350	27546.782

Fuente: Empresa Agroindustrial Pucalá S.A.A

Tabla 4.4 *Datos (presión y temperatura) de la caldera 3*

Corrientes	T (°F)	P (psi)	Flujo de vapor (Lb/h)
Entrada de la Caldera	212	500	
Salida de la Caldera	518	350	49493.7778

Fuente: Empresa Agroindustrial Pucalá S.A.A

Tabla 4.5 Datos (presión y temperatura) de la caldera 4

Corrientes	T (°F)	P (psi)	Flujo de vapor (Lb/h)
Entrada de la Caldera	212	500	47685.9873
Salida de la Caldera	455	350	

Fuente: Empresa Agroindustrial Pucalá S.A.A

Tabla 4.6 Datos (presión y temperatura) de la caldera 5

Corrientes	T (°F)	P (psi)	Flujo de vapor(lb/h)
Entrada de la Caldera	212	500	95989.2689
Salida de la Caldera	698	350	

Fuente: Empresa Agroindustrial Pucalá S.A.A

iii. Cálculo de Eficiencia

Para determinar la eficiencia de cada caldera, se empleará el método indirecto que se expresa en la siguiente fórmula:

$$\eta_{\text{Caldera}} = 100 - \sum \text{pérdidas} (\%)$$

Se necesita saber la composición del combustible, en este caso es el bagazo y se muestra en la siguiente tabla.

iv. Cálculo de aire teóricamente necesario para la combustión del bagazo analizado

Base: 100 lbs. De bagazo seco.

Tabla 4.7 *Análisis de gases en la combustión.*

Ítem	Análisis del bagazo (seco) <u>% en peso, lb.</u>	Peso Molecular	Número de libras
C	49.34	12	4.112
H ₂	6.04	2	3.02
N	0.41	28	0.015
O ₂	42.37	32	1.324
S	0.07	32	Despreciable
Cenizas	1.77	-----	-----
Total	100	-----	-----

Fuente: Empresa Agroindustrial Pucalá S.A.A

Como el carbono tomó igual número de moléculas de oxígeno para pasar a CO₂ y el aire contiene 21% de oxígeno, la cantidad de aire requerida para el carbono del combustible es:

$$4.112 \cdot 100 / 21 = 19.580 \text{ mol. De aire}$$

Por razonamiento análogo, la cantidad de aire requerida para el hidrógeno del combustible es:

$$3.02 / 2 - 1.324 \cdot 100 / 21 = 0.885 \text{ mol. De aire}$$

El número de moles de aire requerido por lb de bagazo seco es:

$$19.580 + 0.885 = 20.465 \text{ moléculas libra de aire}$$

necesarias por 100 libras de bagazo seco o

$$20.465 \cdot 28.9 = 591 \text{ lbs}$$

En la práctica la combustión no puede realizarse consumiendo únicamente cantidad de aire teórico, pero está en el interés de la buena eficiencia de las calderas llevarla a cabo con la mínima cantidad de exceso de aire posible.

v. Cálculo de la cantidad de aire necesario por libra de bagazo seco para diversos porcentajes de exceso de aire

Para 0% de exceso de aire se requiere como: 5.915 lbs de aire por libra de bagazo seco.

vi. Cálculo de la cantidad de productos secos de la combustión por libra de bagazo

Es claro que los productos de la combustión de bagazo serán CO_2 y N_2 cuando la combustión es perfecta y no exista por tanto exceso de aire. Cuando éste se manifiesta además de los productos mencionados existirá O_2 . Se considera los cálculos que no hay existencia de CO . Por lo demás, este producto se encuentra en cantidades despreciables en los gases de combustión de calderas de bagazo.

Para 0% de exceso de aire, la cantidad de productos secos de la combustión por libra de bagazo seco será:

$$\text{CO}_2 = 0.04112 \cdot 44 = 13.8093 \text{ libras}$$

$$\text{N}_2 \text{ del bagazo} = 0.0042 \text{ libras}$$

$$\text{N}_2 \text{ del aire} = 0.20465 \cdot 0.79 \cdot 28 = 4.5270 \text{ libras}$$

Total, de productos secos:

$$\text{Por libra de bagazo} = 6.3405 \text{ libras}$$

vii. **Cálculo de la cantidad de productos húmedos de la combustión por libra de bagazo seco**

Aunque es evidente que el aire introducido para efectuar la combustión lleva una cierta cantidad de agua que tiene que salir con los gases de la chimenea, esta cantidad no es significativa y puede, para propósitos prácticos.

Para 0% de exceso de aire tendremos por libra de bagazo seco quemado:

C	0.4934 libras
H	0.0604 libras
N	0.0041 libras
O	0.4237 libras
TOTAL	0.9816 libras

Más humedad del combustible a 50%.

Humedad: 1.00 libras.

Más aire para la combustión: 5.9150 Libras productos húmedos por libras de bagazo seco: 7.8966 libras

Cuando el bagazo que estamos considerando se quema con la cantidad de aire teóricamente necesario, el gas de la combustión a temperatura ordinaria contiene 20.265 volúmenes de CO₂ por cada cien volúmenes de gases secos – analizador de Orsart (Se emplea con frecuencia en el estudio de gases de combustión, provenientes de hornos, motores de combustión, etc.) y es el máximo teórico. En estas condiciones, la

determinación del contenido de CO₂ de los gases de la caldera constituyen el único medio al alcance de los técnicos de ingenieros para conocer el exceso de aire con que operan las calderas y deben construir uno de los análisis de rutina para el control de este departamento, debiendo llevarse a cabo cuanto menos 3 veces al día (uno en cada turno).

viii. Cálculo del porcentaje (%) en volumen de CO₂ en gases secos para diversos porcentajes de exceso de aire.

Por cada libra de bagazo seco quemado para 0% de exceso de aire se obtendrá:

	Libras	Moles
CO₂	0.4934	0.04112
N (combustible)	0.0041	0.00015
N (aire) 0.20465*0.79		0.16167
Moles totales gases secos		0.20294
%CO₂ = (0.04112*100)/0.2094		20.26%

Es evidente que el CO₂ para diversos porcentajes de exceso de aire estará dado por la siguiente expresión:

$$(0.04122*100) / (0.20294+0.20465E) = \%CO_2 \text{ en volúmenes}$$

Se procede a calcular las eficiencias de las calderas con el método que se muestra anteriormente (*cálculo de eficiencia*) en el capítulo III.

B. Desarrollo de las ecuaciones en las calderas (Eficiencias reales de las calderas en la empresa)

1. Caldera N° 01 y N° 02

a) Pérdida debida a la humedad de bagazo

Pérdida de calor por humedad en el bagazo

$$Q = W(T_a - T_b) + 970.3(W) + WC_p(T_2 - T_a) \quad W = 1$$

W :	Peso del agua en libras.	°C	°F	°K
T2 :	Temperatura de salida de los gases de la chimenea.	T2= 128	262.40	401.15
Ta :	Temperatura a la que se calienta el agua del bagazo.	Ta= 100	212	373.15
Tb :	Temperatura del agua del bagazo.	Tb= 30	86	303.15
Cp :	Calor específico medio	$C_p = a + \frac{b}{2}(T_2 + T_a) + \frac{c}{3}(T_2^2 + T_2T_a + T_a^2)$		
		a	b*10 ³	c*10 ⁶
		6.89	3.283	0.343
			8.2	
		Cp =	0.456	

Q = 1119.295 Btu/lb

Pérdida en (%) 14.56 %

b) Pérdida por hidrógeno de combustible

Pérdida por hidrógeno del combustible

$$Q = W(T_a - T_b) + 970.3(W) + WC_p(T_2 - T_a)$$

W = 9 x 0.0604 = 0.5436

Q = 608.4486 Btu/lb

Pérdida en (%) 8.529 %

c) Pérdida de humedad en el aire

Pérdida de humedad en el aire

$$Q = WC_p (T_2 - T_b)$$

Exc. Aire : 27 %

Aire seco (lb) = 5.915 x 1.27 7.512

H =	0.026	lb de agua/lb de aire seco	$C_p = a + \frac{b}{2}(T_2 + T_b) + \frac{c}{3}(T_2^2 + T_2T_b + T_b^2)$
-----	-------	----------------------------	--

W(lb) = 7.512 x 0.026 0.195 8.2

Q = 16.467 Btu/lb Cp = 0.456

Pérdida en (%) 0.21 %

d) Pérdida por gases secos.

Pérdida por gases secos

Número de mols. Libra

CO2 0.4112

N2 0.4405

O2 0.07410

P. CO2 = 0.04112x9.6131(300-86) 69.73 Btu/lb

P.N2 = 0.01670x6.9127(300-86) 537.15 Btu/lb

P.O2 = 0.001367x7.1061(300-86) 9.29 Btu/lb

616.16 Btu/lb

Pérdida en (%) 8.01 %

d) Pérdida por combustión incompleta del bagazo

Despreciable.

e) Pérdidas por purgas en las calderas

Se considera 2%.

f) Pérdidas indeterminadas (cenizas)

Se considera 2%.

g) Pérdida por radiación

Se considera 2 %.

Eficiencia de la caldera: 62.686 %.

- De la misma manera se calcula las demás eficiencias de las calderas

C. Balance térmico de los turbogeneradores**1. inspección visual de los turbogeneradores para determinar su estado actual.***Tabla 4.8 Inspección visual de los turbogeneradores*

Ítem	Si	No
<i>Nivel de aceite optimo</i>	X	
<i>Válvulas de seguridad</i>	X	
<i>Manómetros en buen estado</i>	X	
<i>Termómetros en buen estado</i>	X	
<i>Aislante en tuberías</i>	X	
<i>Ambientes limpios</i>	X	
<i>Instrumentos de seguridad</i>	X	
<i>Iluminación</i>	X	
<i>Registro de actividades</i>	X	
<i>Señales de seguridad</i>	X	

Fuente: Propia

2. Mediciones de datos en los turbogeneradores

Se tomaron medidas en la entrada y la salida de los turbogeneradores las cuales se muestran en la Tabla siguientes.

Tabla 4.9 Datos del turbogenerador Siemens

Corrientes	T (°C)	P (bar)	Flujo de vapor (Tn/h)
Entrada de la turbina	350	20	32
Salida de la turbina	103.6	2	

Fuente: Empresa Agroindustrial Pucalá S.A.A

Tabla 4.10 Datos del Turbogenerador Worthington

Corrientes	T (°C)	P (bar)	Flujo de vapor (Tn/h)
Entrada de la turbina	338	25	11
Salida de la turbina	162	2	

Fuente: Empresa Agroindustrial Pucalá S.A.A

3. Cálculo de la eficiencia en los turbogeneradores.

a. En el Turbogenerador Siemens

Realizamos el balance de energía según los parámetros obtenidos por datos de instrumentación.

$$P_{G.E} = \frac{\dot{m} * (h_1 - h_2) * \eta_m * \eta_{G.E}}{3600}$$

Donde:

\dot{m} = Flujo másico necesario para la turbina siemens = 32 tn/h

h_1 = Entalpía a la entrada de la turbina = 3137.7 KJ/Kg

h_2 = Entalpía a la salida de la turbina = 2706.3 KJ/Kg

$n_m = \text{Rendimiento Mecánico} = 0.98$

$n_{G.E} = \text{Rendimiento del Generador Eléctrico} = 0.94$

$P_{G.E} = \text{Potencia del Generador Eléctrico [MW]}$

Para realizar este cálculo y determinar las entalpías se consideró los siguientes parámetros:

$T_{\text{vapor } 1} = \text{Temperatura de vapor a la entrada de la turbina siemens}$
 $= 350 \text{ } ^\circ\text{C}$

$P_{\text{vapor } 1} = \text{Presión del vapor a la entrada de la turbina siemens} =$
 20 bar

$T_{\text{vapor } 2} = \text{Temperatura de vapor a la salida de la turbina siemens}$
 $= 103.6 \text{ } ^\circ\text{C}$

$P_{\text{vapor } 2} = \text{Presión del vapor a la salida de la turbina siemens} = 2$
 bar

$$P_{G.E} = \frac{32}{3600} * (3137.7 - 2706.3) * 0.98 * 0.94$$

$$P_{G.E} = 3.54 \text{ MW}$$

- **Rendimiento Isentrópico en el Turbo generador “Siemens”**

$$\eta_{\text{isen}} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{\square}}$$

Donde:

$h_1 = \text{Entalpía a la entrada de la Turbina} = 3137.7 \text{ KJ/Kg}$

$h_2 = \text{Entalpía real a la salida de la turbina} = 2706.3 \text{ KJ/Kg}$

$h_{\square} = \text{Entalpía ideal a la salida de la turbina} = 2639.811 \text{ KJ/Kg}$

$$\eta_{isen} = \frac{3137.7-2706.3}{3137.7-2639.811}$$

$$\eta_{isen} = 86.623\%$$

- De la misma manera se calcula la eficiencia del turbogenerador Worthington.

D. Cálculos en las turbinas.

1. Mediciones en las turbinas.

Se tomaron medidas en la entrada y la salida de los turbogeneradores las cuales se muestran en la Tabla siguientes.

Tabla 4.11 Datos de las Turbinas de Trapiche.

N° Turbina	Datos	T (°C)	P (bar)	Flujo (Tn/h)
1	Entrada	310	20	49
	Salida	200	2	
2	Entrada	309	20	
	Salida	218	2	
3	Entrada	311	20	
	Salida	211	2	
4	Entrada	310	20	
	Salida	200	2	
5	Entrada	309	20	
	Salida	219	2	
6	Entrada	311	20	
	Salida	210	2	

Fuente: Empresa Agroindustrial Pucalá S.A.A

2. Cálculos en las Turbinas de trapiche “Worthington”

a. Turbina 01

Realizamos el balance de energía según los parámetros obtenidos por datos de instrumentación.

$$P_G = \frac{\dot{m} * (h_1 - h_2) * \eta_m}{3600}$$

Dónde:

\dot{m} = Flujo másico necesario para la turbina Worthington = 49 tn/h

h_1 = Entalpía a la entrada de la turbina Worthington = 3046.9 KJ/Kg

h_2 = Entalpía a la salida de la turbina Worthington = 2706.3 KJ/Kg

η_m = Rendimiento Mecánico = 0.98

P_G = Potencia Generada [MW]

Para realizar este cálculo y determinar las entalpías se consideró los siguientes parámetros:

$T_{\text{vapor } 1}$ = Temperatura de vapor a la entrada de la turbina Worthington = 310 °C

$P_{\text{vapor } 1}$ = Presión del vapor a la entrada de la turbina Worthington = 20 bar

$T_{\text{vapor } 2}$ = Temperatura de vapor a la salida de la turbina Worthington = 200 °C

$P_{\text{vapor } 2}$ = Presión del vapor a la salida de la turbina Worthington = 2 bar

$$P_G = \frac{49}{3600} * (3046.9 - 2706.3) * 0.98$$

$$P_G = 4.543 \text{ MW.}$$

- Rendimiento isentrópicos en las Turbinas de trapiche “Worthington.”

$$\eta_{isen} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{\square}}$$

Donde:

h_1 = Entalpía a la entrada de la Turbina = 3046.9 KJ/Kg

h_2 = Entalpía real a la salida de la turbina = 2706.3 KJ/Kg

h_{\square} = Entalpía ideal a la salida de la turbina = 2579.2676 KJ/Kg

$$\eta_{isen} = \frac{3046.9 - 2706.3}{3046.9 - 2579.2676}$$

$$\eta_{isen} = 72.83\%.$$

- De la misma manera se calcula la eficiencia de las demás turbinas Worthington.

Eficiencia del Ciclo de vapor.

$$\eta_T = \frac{\dot{Q}_{\square\square\square\square}}{\dot{Q}_{\square}} = \frac{\dot{Q}_{\square} - \dot{Q}_{\square}}{\dot{Q}_{\square}}$$

$$\dot{Q}_{\square} = \dot{Q}_{\square\square} + \dot{Q}_{\square\square} + \dot{Q}_{\square 1} + \dot{Q}_{\square 2} + \dot{Q}_{\square 3} + \dot{Q}_{\square 4} + \dot{Q}_{\square 5} + \dot{Q}_{\square}$$

$$\dot{Q}_{\square\square} = 431.4 \text{ KJ/Kg}$$

$$\dot{Q}_{\square\square} = 392.52 \text{ KJ/Kg}$$

$$\dot{Q}_{\square 1} = 340.6 \text{ KJ/Kg}$$

$$\dot{Q}_{\square 2} = 338.3 \text{ KJ/Kg}$$

$$\dot{Q}_{\square 3} = 342.87 \text{ KJ/Kg}$$

$$\dot{Q}_{\square 4} = 340.6 \text{ KJ/Kg}$$

$$\dot{Q}_{\square 5} = 338.3 \text{ KJ/Kg}$$

$$\dot{Q}_{\square 6} = 342.87 \text{ KJ/Kg}$$

$$\dot{Q}_{\square} = 2867.46 \text{ KJ/Kg}$$

$$\dot{Q}_{\square} = \dot{Q}_{\square 1} + \dot{Q}_{\square 2}$$

$$\dot{Q}_{\square 1} = 3.458 \text{ KJ/Kg}$$

$$\dot{Q}_{\square 2} = 3.458 \text{ KJ/Kg}$$

$$\dot{Q}_{\square} = 6.916 \text{ KJ/Kg}$$

$$\dot{Q}_{\square} = \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 + \dot{Q}_3 + \dot{Q}_4 + \dot{Q}_5$$

$$\dot{q}_1 = 2684.0834 \text{ KJ/Kg}$$

$$\dot{q}_2 = 2684.0834 \text{ KJ/Kg}$$

$$\dot{q}_3 = 2515.5228 \text{ KJ/Kg}$$

$$\dot{q}_4 = 2419.8126 \text{ KJ/Kg}$$

$$\dot{q}_5 = 2752.5516 \text{ KJ/Kg}$$

$$\dot{q}_q = 13056.0538 \text{ KJ/Kg}$$

$$\eta_T = \frac{\dot{q}_q - \dot{q}_q}{\dot{q}_q} = \frac{2867.46 - 6.8874}{13056.0538}$$

$$\eta_T = 21.90\%$$

4.1.2 Balance de exergético.

A) Balance exergético en las turbinas.

Para realizar el balance exergético el ciclo de potencia de vapor se usara los datos de entrada y salida de presión y temperatura del vapor en las 6 turbinas, promediando los valores, luego se procederá con el cálculo teniendo en cuenta el circuito del vapor en la planta, se calculará las perdidas y la eficiencia en todo el ciclo de potencia del vapor de la planta Agroindustrial Pucalá S.A.A.

Tabla 4.12 Datos para calcular el ciclo de exergía.

Potencia calorífica del bagazo	18821	Kj/Kg Fuel
Temperatura de combustión de la caldera	1600	Kj/Kg Fuel
Pérdidas en las calderas	14.67	
Presión del vapor a la salida de la caldera	25	Bar
Temperatura la salida de la caldera	546.8	°C
presión a la entrada de la turbina	20	Bar
Temperatura a la entrada de la turbina	310	°C
Temperatura a la entrada del condensador	30	°C
Rendimiento isotrópico de la turbina	0.73	
Condiciones ambientales,(estado muerto)	1	Bar
	20	°C

Fuente: Propia*Tabla 4.13 resultados del cálculo de exergía*

Punto	resultados
Exergía en la combustión	13547.92 KJ/KG BAGAZO
Exergía en la caldera	6458.26 KJ/KG BAGAZO
Exergía en la turbina	4875.92 KJ/KG BAGAZO
Exergía en el condensador	450 KJ/KG BAGAZO
Exergía perdida en la tubería	1592.34 KJ/KG BAGAZO
Perdida de exergía en la turbina	1102.93 KJ/KG BAGAZO
Exergía del calor cedido al condensador	340.19 KJ/KG BAGAZO
Exergía perdida en la caldera	7079.66KJ/KG BAGAZO
Trabajo en la turbina	3322.95 KJ/KG BAGAZO
Perdida de exergía combustión en caldera	5092.42 KJ/KG BAGAZO

Fuente: Propia

Tabla 4.14 Eficiencia exergéticas del ciclo de vapor

punto	Eficiencia
Caldera	47.74
Turbina	68.2 %
rendimiento exergético en el ciclo	24.527 %

Fuente: Propia.

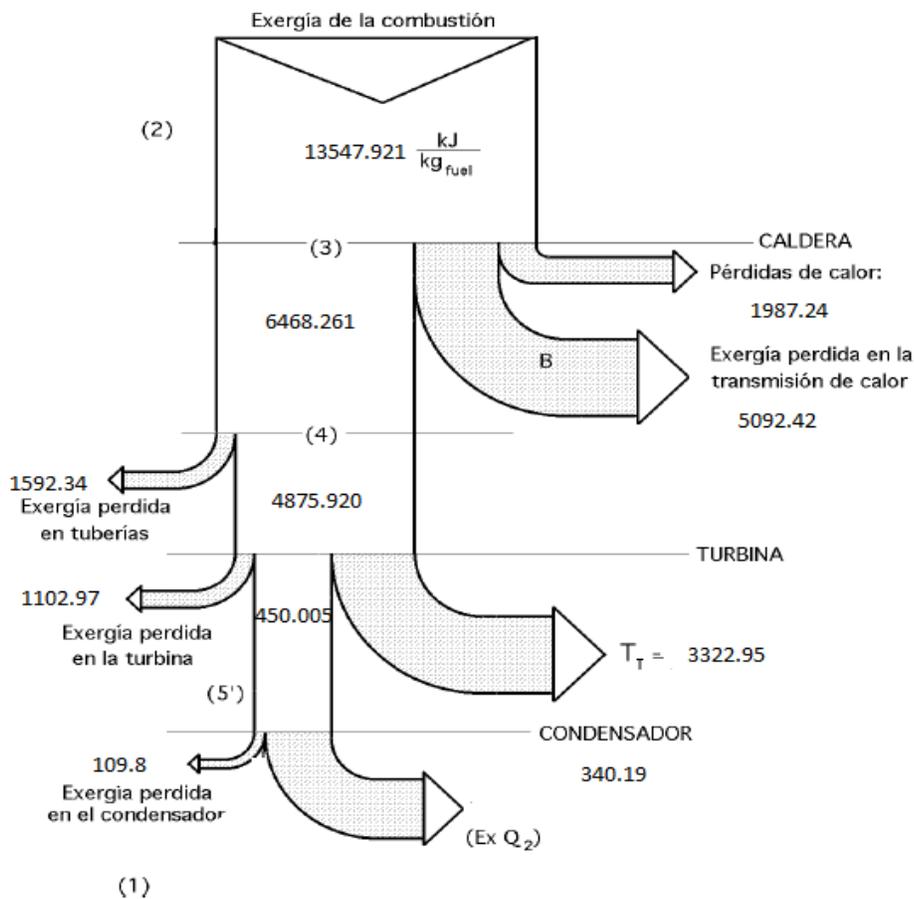


Figura 4.1 distribución de exergía en el ciclo

Fuente: propia

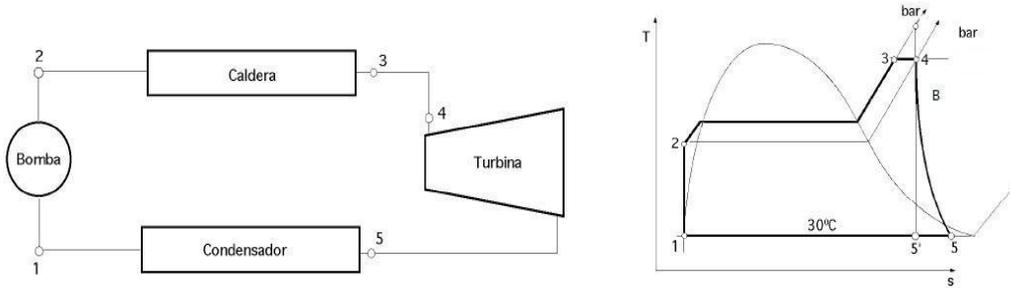


Figura 4.2 Ciclo del vapor
Fuente: propia.

4.1.3 Incremento de eficiencia térmica en el ciclo de potencia de vapor Con ayuda de buenas Prácticas.

Basándonos una vez más en el procedimiento que describe el Ing. Jesús Acosta Cueto en su artículo científico. Al emplear las prácticas se sigue considerando un porcentaje de humedad de 50%, el exceso de aire será 30%, y las temperaturas en la salida de las chimeneas para las calderas serán:

Tabla 4.15 Temperatura ideal de los gases de la chimenea

Temperatura de los gases de la chimenea (°C)	
Caldera 1	119.9
Caldera 2	119.9
Caldera 3	128.9
Caldera 4	132.9
Caldera 5	148.9

Fuente: Propia.

A. Desarrollo de las ecuaciones en las calderas.
a. Caldera No 01

Tabla 4.16 Datos (presión y temperatura) de la caldera 1

Corrientes	T (°F)	P (psi)	Flujo de vapor (Lb/h)
Entrada de la Caldera	212	500	37919.54
Salida de la Caldera	550	450	

Fuente: Empresa Agroindustrial Pucalá S.A.A

Tabla 4.17 Datos (presión y temperatura) de la caldera 2

Corrientes	T (°F)	P (psi)	Flujo de vapor (Lb/h)
Entrada de la Caldera	212	500	37919.54
Salida de la Caldera	550	450	

Fuente: Empresa Agroindustrial Pucalá S.A.A

Tabla 4.18 Datos (presión y temperatura) de la caldera 3

Corrientes	T (°F)	P (psi)	Flujo de vapor (Lb/h)
Entrada de la Caldera	212	500	65918.2701
Salida de la Caldera	550	450	

Fuente: Empresa Agroindustrial Pucalá S.A.A

Tabla 4.19 Datos (presión y temperatura) de la caldera 4

Corrientes	T (°F)	P (psi)	Flujo de vapor (Lb/h)
Entrada de la Caldera	212	500	69886.5941
Salida de la Caldera	550	450	

Fuente: Empresa Agroindustrial Pucalá S.A.A

Tabla 4.20 Datos (presión y temperatura) de la caldera 5

Corrientes	T (°F)	P (psi)	Flujo de vaor (lb/h)
Entrada de la Caldera	212	500	119931.5684
Salida de la Caldera	550	500	

Fuente: Empresa Agroindustrial Pucalá S.A.A

1. Caldera N° 01 y N° 02

a) Pérdida debida a la humedad de bagazo

Pérdida de calor por humedad en el bagazo

$$Q = W(T_a - T_b) + 970.3(W) + WC_p(T_2 - T_a)$$

W = 1

W :	Peso del agua en libras.	°C	°F	°K
T2 :	Temperatura de salida de los gases de la chimenea.	T2= 119.9	247.82	393.05
Ta :	Temperatura a la que se calienta el agua del bagazo.	Ta= 100	212	373.15
Tb :	Temperatura del agua del bagazo.	Tb= 30	86	303.15
Cp :	Calor específico medio	$Cp = a + \frac{b}{2}(T_2 + T_a) + \frac{c}{3}(T_2^2 + T_2T_a + T_a^2)$		

		a	b*10 ³	c*10 ⁶
Q =	1112.6142	Btu/lb	6.89	3.283
			8.1981	
		Cp =	0.455	

Pérdida en (%) 14.47 %

b) Pérdida por hidrógeno de combustible

Pérdida por hidrógeno del combustible

$$Q = W(T_a - T_b) + 970.3(W) + WC_p(T_2 - T_a)$$

$$W = 9 \times 0.0604 = 0.5436$$

$$Q = 604.82 \text{ Btu/lb}$$

Pérdida en (%) 8.478 %

c) Pérdida de humedad en el aire

Pérdida de humedad en el aire

$$Q = WC_p(T_2 - T_b)$$

Exc. Aire : 30 %

$$\text{Aire seco (lb)} = 5.915 \times 1.30 = 7.689$$

$$H = 0.026 \text{ lb de agua/lb de aire seco}$$

$$C_p = a + \frac{b}{2}(T_2 + T_b) + \frac{c}{3}(T_2^2 + T_2T_b + T_b^2)$$

$$W(\text{lb}) = 7.393 \times 0.026 = 0.200 \quad 8.409$$

$$Q = 8.40 \text{ Btu/lb} \quad C_p = 0.467$$

Pérdida en (%) 0.19 %

d) Pérdida por gases secos.

Pérdida por gases secos

Número de mols. Libra

CO ₂	0.4112
N ₂	0.4405
O ₂	0.07410

P. CO ₂ = 0.04112x9.6131(300-86)	63.97	Btu/lb
P.N ₂ = 0.01670x6.9127(300-86)	492.75	Btu/lb
P.O ₂ = 0.001367x7.1061(300-86)	8.52	Btu/lb
	565.24	Btu/lb

Pérdida en (%) 7.35 %

e) Pérdida por combustión incompleta del bagazo

Despreciable.

f) Pérdidas por purgas en las calderas

Se considera 2%.

g) Pérdidas indeterminadas (cenizas)

Se considera 1.5%.

h) Pérdida por radiación

Se considera 1.5%.

Eficiencia de la caldera: 64.5 %.

- De la misma manera se calcula la eficiencia exergética de las turbinas Worthington.

B. Balance en los Turbogeneradores**1. Mediciones de datos en los turbogeneradores**

Se tomaron medidas en la entrada y la salida de los turbogeneradores las cuales se muestran en la Tabla siguientes.

1.1 Datos del Turbogenerador Siemens.

Tabla 4.21 Datos del turbogenerador Siemens

Corrientes	T (°C)	P (bar)	Flujo (Tn/h)
Entrada de la turbina	450	30	38
Salida de la turbina	103.6	2	

Fuente: Empresa Agroindustrial Pucalá S.A.A.

Tabla 4.22 Datos del Turbogenerador Worthington

Corrientes	T (°C)	P (bar)	Flujo (Tn/h)
Entrada de la turbina	450	30	17
Salida de la turbina	162	2	

Fuente: Empresa Agroindustrial Pucalá S.A.A.

2. Cálculo de la eficiencia en los turbogeneradores.

a. En el Turbogenerador Siemens

Realizamos el balance de energía según los parámetros obtenidos por datos de instrumentación.

$$P_{G.E} = \frac{\dot{m} * (h_1 - h_2) * n_m * n_{G.E}}{3600}$$

Dónde:

\dot{m} = Flujo másico necesario para la turbina siemens = 38 tn/h

h_1 = Entalpía a la entrada de la turbina = 3185.46 KJ/Kg

h_2 = Entalpía a la salida de la turbina = 2706.3 KJ/Kg

n_m = Rendimiento Mecánico = 0.985

$n_{G.E}$ = Rendimiento del Generador Eléctrico = 0.94

$P_{G.E}$ = Potencia del Generador Eléctrico [MW]

Para realizar este cálculo y determinar las entalpías se consideró los siguientes parámetros:

$T_{\text{vapor } 1}$ = Temperatura de vapor a la entrada de la turbina siemens
= 380 °C

$P_{\text{vapor } 1}$ = Presión del vapor a la entrada de la turbina siemens = 30
bar

$T_{\text{vapor } 2}$ = Temperatura de vapor a la salida de la turbina siemens =
103.6 °C

$P_{\text{vapor } 2}$ = Presión del vapor a la salida de la turbina siemens = 2
bar

$$P_{G.E} = \frac{38}{3600} * (3185.46 - 2706.3) * 0.985 * 0.94$$

$$P_{G.E} = 4.68 \text{ MW}$$

-Rendimiento Isentrópico en el Turbo generador “Siemens”

$$\eta_{\text{isen}} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{\square}}$$

Dónde:

h_1 = Entalpía a la entrada de la Turbina = 3185.46 KJ/Kg

h_2 = Entalpía real a la salida de la turbina = 2706.3 KJ/Kg

h_{\square} = Entalpía ideal a la salida de la turbina = 2597.9912 KJ/Kg

$$\eta_{\text{isen}} = \frac{3185.46 - 2706.3}{3185.46 - 2597.9912}$$

$$\eta_{\text{isen}} = 87.033\%$$

- De la misma manera se calcula la eficiencia del turbogenerador Worthington.

C. Cálculos en las turbinas.

1. Mediciones en las turbinas.

Las medidas mostradas en la entrada y la salida de los turbogeneradores las cuales se muestran en la Tabla siguiente son medidas ideales, las que se obtendrán mediante las buenas prácticas.

Tabla 4.23 Datos de las Turbinas de Trapiche

N° Turbina	Dato	T (°C)	P (bar)	Flujo (Tn/h)
1	Entrada	450	30	55.2
	Salida	210	2	
2	Entrada	450	30	
	Salida	210	2	
3	Entrada	450	30	
	Salida	210	2	
4	Entrada	450	30	
	Salida	210	2	
5	Entrada	450	30	
	Salida	210	2	
6	Entrada	450	30	
	Salida	210	2	

Fuente: Empresa Agroindustrial Pucalá S.A.A

Cálculos en las Turbinas de trapiche

Realizamos el balance de energía según los parámetros obtenidos por datos idealizados.

$$P_G = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot (h_1 - h_2) \cdot \eta_m}{3600}$$

Dónde:

\dot{m} = Flujo másico necesario para la turbina Worthington =
55.2 tn/h

h_1 = Entalpía a la entrada de la turbina Worthington = 3116.1 KJ/Kg

h_2 = Entalpía a la salida de la turbina Worthington = 2706.3 KJ/Kg

n_m = Rendimiento Mecánico = 0.985

P_G = Potencia Generada [MW]

Para realizar este cálculo y determinar las entalpías se consideró los siguientes parámetros:

$T_{\text{vapor } 1}$ = Temperatura de vapor a la entrada de la turbina Worthington
= 450 °C

$P_{\text{vapor } 1}$ = Presión del vapor a la entrada de la turbina Worthington =
25 bar

$T_{\text{vapor } 2}$ = Temperatura de vapor a la salida de la turbina Worthington
= 210 °C

$P_{\text{vapor } 2}$ = Presión del vapor a la salida de la turbina Worthington = 2
bar

$$P_G = \frac{55.2}{3600} * (3116.1 - 2706.3) * 0.985$$

$$P_G = 6.18 \text{ MW}$$

- Rendimiento isentrópicos en las Turbinas de trapiche “Worthington.”

$$\eta_{isen} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{\square}}$$

Donde:

h_1 = Entalpía a la entrada de la Turbina = 3116.1 KJ/Kg

h_2 = Entalpía real a la salida de la turbina = 2706.3 KJ/Kg

h_{\square} = Entalpía ideal a la salida de la turbina = 2555.9407 KJ/Kg

$$\eta_{isen} = \frac{3116.1 - 2706.3}{3116.1 - 2555.9407}$$

$$\eta_{isen} = 73.15\%$$

D. Eficiencia del Ciclo de vapor

$$\eta_T = \frac{\dot{Q}_{\square\square\square\square}}{\dot{Q}_{\square}} = \frac{\dot{Q}_{\square} - \dot{Q}_{\square}}{\dot{Q}_{\square}}$$

$$\dot{Q}_{\square} = \dot{Q}_{\square\square} + \dot{Q}_{\square\square} + \dot{Q}_{\square 1} + \dot{Q}_{\square 2} + \dot{Q}_{\square 3} + \dot{Q}_{\square 4} + \dot{Q}_{\square 5} + \dot{Q}_{\square}$$

$$\dot{Q}_{\square\square} = 479.16 \text{ KJ/Kg}$$

$$\dot{Q}_{\square\square} = 409.8 \text{ KJ/Kg}$$

$$\dot{Q}_{\square 1} = \dot{Q}_{\square 2} = \dot{Q}_{\square 3} = \dot{Q}_{\square 4} = \dot{Q}_{\square 5} = \dot{Q}_{\square 6} = 409.8 \text{ KJ/Kg}$$

$$\dot{Q}_{\square} = 3347.76 \text{ KJ/Kg}$$

$$\dot{Q}_{\square} = \dot{Q}_{\square 1} + \dot{Q}_{\square 2}$$

$$\dot{Q}_{\square 1} = 3.458 \text{ KJ/Kg}$$

$$\dot{Q}_{\square 2} = 3.458 \text{ KJ/Kg}$$

$$\dot{Q}_{\square} = 6.916 \text{ KJ/Kg}$$

$$\dot{Q}_{\square} = \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 + \dot{Q}_3 + \dot{Q}_4 + \dot{Q}_5$$

$$\dot{Q}_1 = 2662.6935 \text{ KJ/Kg}$$

$$\dot{Q}_2 = 2662.6935 \text{ KJ/Kg}$$

$$\dot{Q}_3 = 2506.5259 \text{ KJ/Kg}$$

$$\dot{Q}_4 = 2662.6935 \text{ KJ/Kg}$$

$$\dot{Q}_5 = 2799.16 \text{ KJ/Kg}$$

$$\dot{Q}_{\square} = 13293.7664 \text{ KJ/Kg}$$

$$\eta_T = \frac{\dot{Q}_{out} - \dot{Q}_{in}}{\dot{Q}_{in}} = \frac{3347.76 - 6.916}{13293.7664}$$

$$\eta_T = 25.131\%$$

Tabla 4.24 Comparación de eficiencias térmicas.

	Eficiencia térmica (%)	
	Real	Ideal
Caldera 1	63.19	64.5
Caldera 2	63.19	64.5
Caldera 3	62.26	63.81
Caldera 4	61.86	63.41
Caldera 5	60.25	61.04
Turbogenerador Siemens	86.62	87.03
Turbogenerador Worthington	75.04	75.87
Turbina de Trapiche 1	72.83	73.16
Turbina de Trapiche 2	72.6	73.16
Turbina de Trapiche 3	73.15	73.16
Turbina de Trapiche 4	72.83	73.16
Turbina de Trapiche 5	72.6	73.16
Turbina de Trapiche 6	73.15	73.16
Toda la Planta	21.22	25.13

Fuente: propio

E. Balance exerético de las calderas.

Con los datos obtenidos anteriormente en la entrada y salida de la caldera, calculamos las entalpías para luego calcular la eficiencia exerética.

Tabla 4.25 Datos necesarios para el incremento de exería.

Potencia calorífica del bagazo	18821	Kj/Kg Fuel
Temperatura de combustión de la caldera	1600	Kj/Kg Fuel
Pérdidas en las calderas	14.58	
Presión del vapor a la salida de la caldera	30	Bar
Temperatura la salida de la caldera	550	°C
presión a la entrada de la turbina	25	Bar
Temperatura a la entrada de la turbina	450	°C
Temperatura a la entrada del condensador	30	°C
Rendimiento isentropico de la turbina	0.732	
Condiciones ambientales,(estado muerto)	1	Bar
	20	°C
Trabajo del bombeo(despreciable)		

Fuente: propio

Tabla 4.26 resultados del incremento de exería del ciclo de vapor

Punto	resultados
Exería en la combustión	13561.78 KJ/KG BAGAZO
Exería en la caldera	6590.80 KJ/KG BAGAZO
Exería en la turbina	5839.99 KJ/KG BAGAZO
Exería en el condensador	100.63 KJ/KG BAGAZO
Exería perdida en la tubería	750.81 KJ/KG BAGAZO
Perdida de exería en la turbina	1693.35 KJ/KG BAGAZO
Exería del calor cedido al condensador	363.41 KJ/KG BAGAZO
Exería perdida en la caldera	6970.97KJ/KG BAGAZO
Trabajo en la turbina	4046.01 KJ/KG BAGAZO
Perdida de exería combustión en caldera	4993.54 KJ/KG BAGAZO

Fuente: propio

Tabla 4.27 Incremento de eficiencias de exergía..

punto	Eficiencia
Caldera	48.598
Turbina	69.3 %
rendimiento exergético en el ciclo	29.83 %

Fuente: propia.

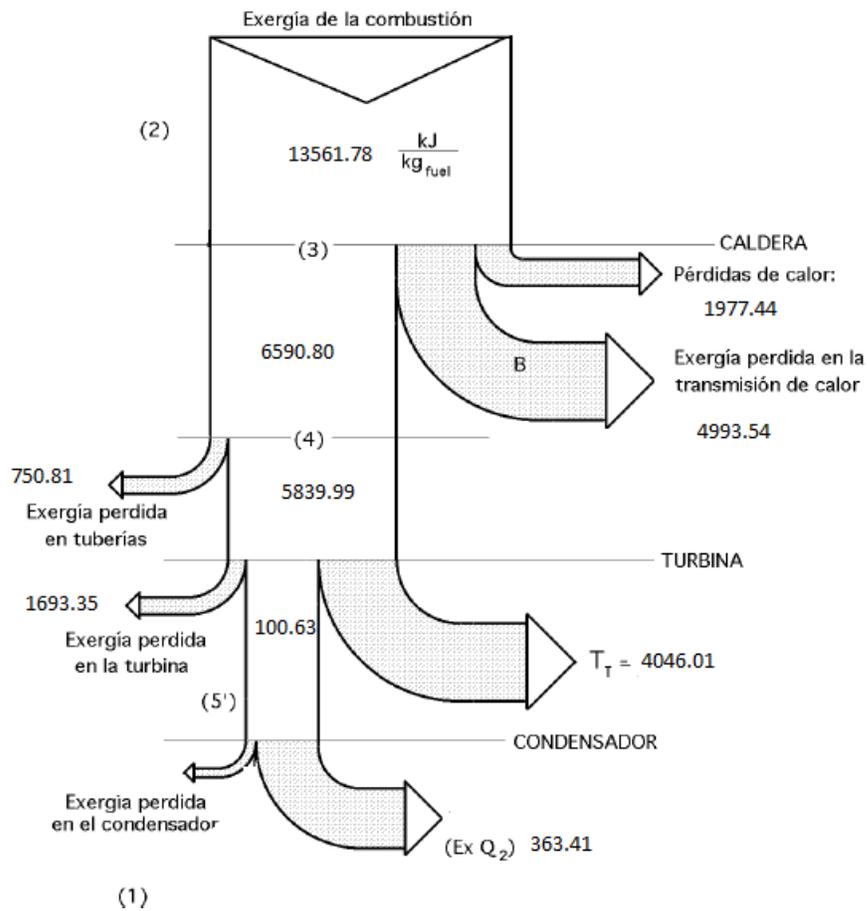


Figura 4.3 incremento de distribución de exergía en el ciclo

Fuente: propia

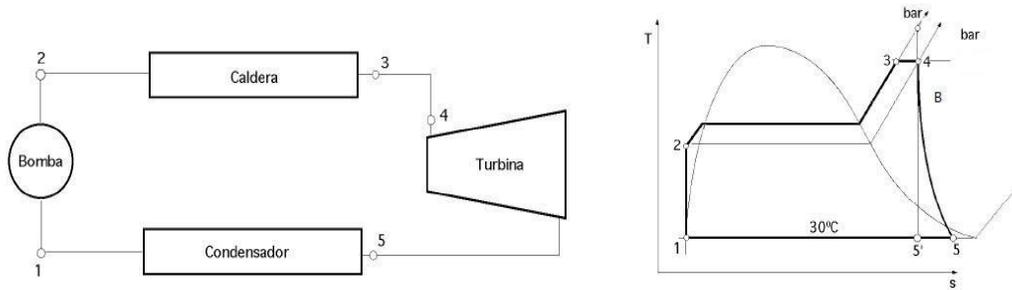


Figura 4.4 Ciclo del vapor
Fuente: propia.

INCREMENTO DE LA EFICIENCIA APLICANDO EL METODO EXERGÉTICO.

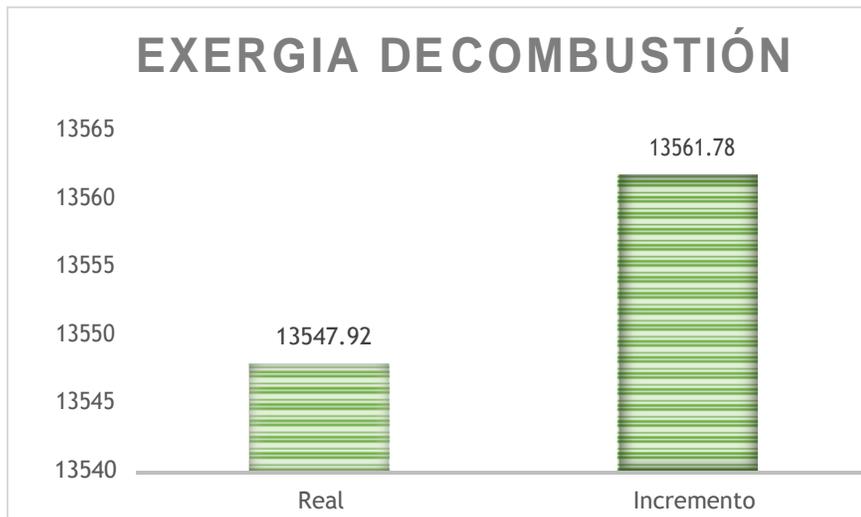


Gráfico 4.1 Exergía de combustión
Fuente: propia

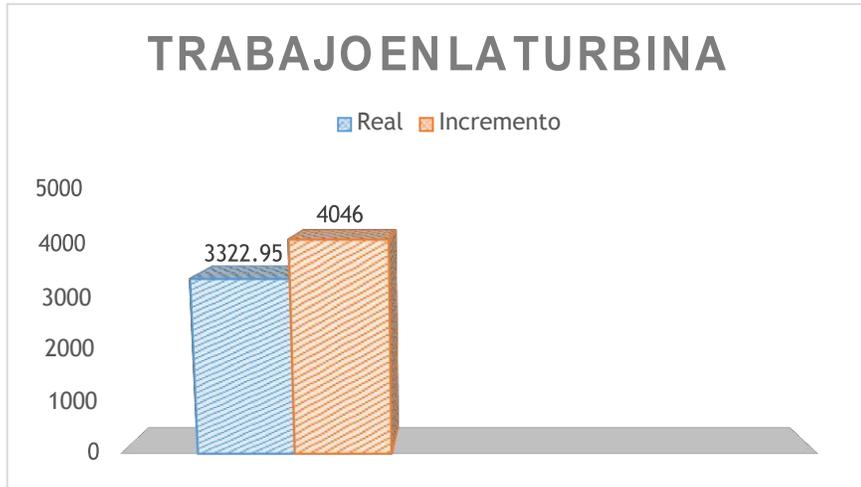


Gráfico 4.2 Trabajo en la turbina
Fuente: propia

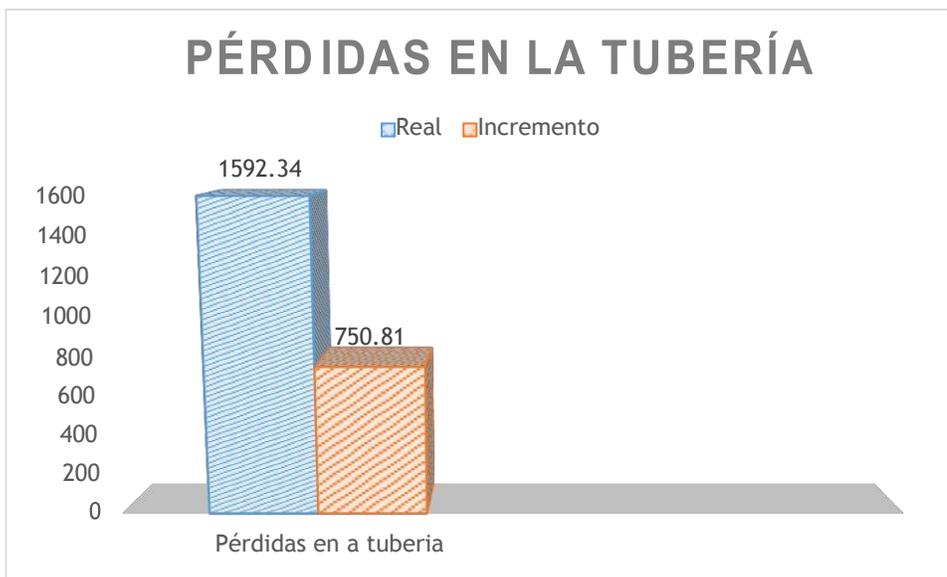


Gráfico 4.3 Pérdidas en la tubería
Fuente: propia

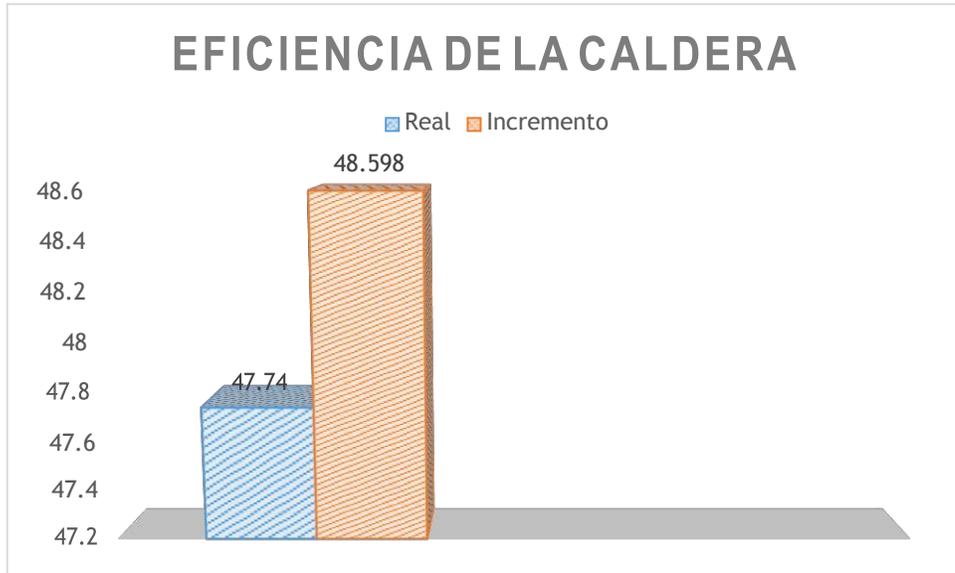


Gráfico 4.4 Eficiencia de la caldera
Fuente: propia

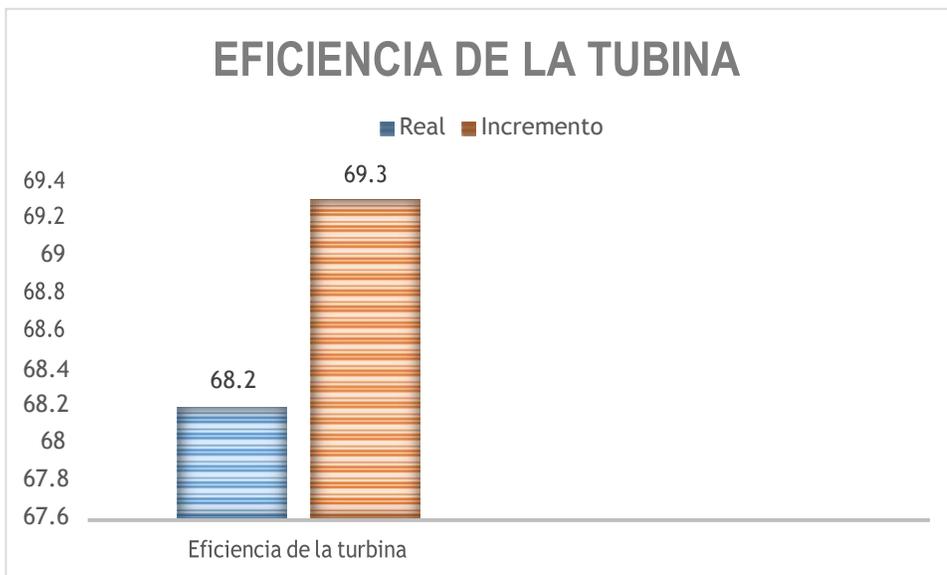


Gráfico 4.5 Eficiencia de la turbina
Fuente: propia

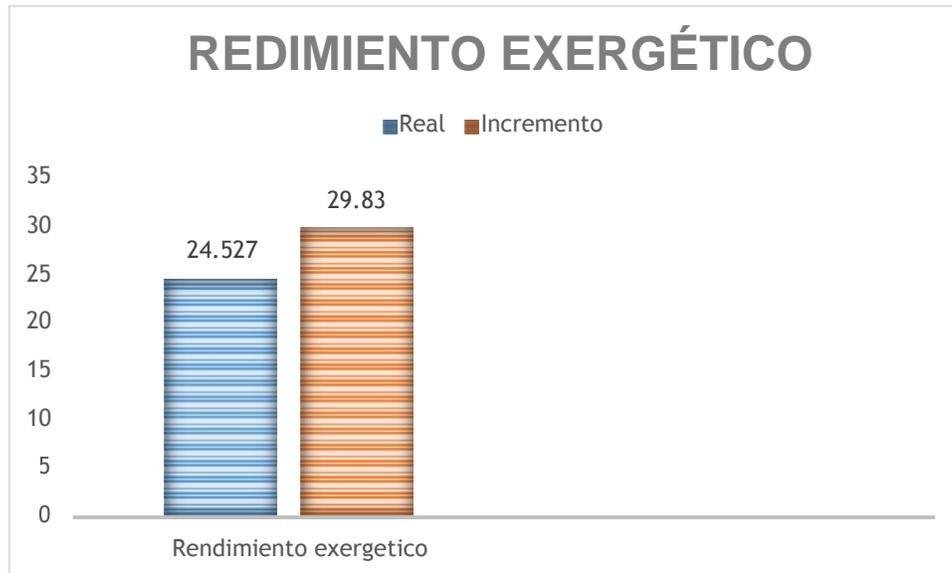


Gráfico 4.6 Rendimiento exergetico

Fuente: propia

4.1.4 Selección de buenas prácticas para incrementar la eficiencia.

A continuación, seleccionaremos las prácticas que más se adapta con las necesidades y posibilidades de la empresa.

A) Calderas

1. Buena operación (operadores de alimentación de bagazo y agua).
2. El tratamiento del control del agua. mantener sus niveles dentro de los parámetros establecidos en conductividad, dureza, PH, sulfitos y fosfatos, con la finalidad de evitar corrosión y calchamiento de las tuberías internas.
3. Llevar un control de purgas de lodos de manera adecuada.

4. La combustión del bagazo dentro de los hornos se mantiene a una temperatura de combustión de 1600 °C y manteniendo un exceso de aire de 30%.
5. Inspeccionar y revisar que las válvulas de seguridad estén activas y operativas con la finalidad de dar la tranquilidad de seguridad al operador.
6. Procurar una combustión eficiente, manteniendo los quemadores bien ajustados para una relación constante aire combustible.
7. Hacer un buen control interno y externo del agua de la caldera y de las purgas, para evitar incrustaciones.

B) Turbinas.

1. Tener su dispositivo de disparo de sobrevelocidad operativo y activo en caso de existir un embalamiento de la turbina.
2. Asegurar siempre que el vapor que entre a la turbina sea siempre limpio, libre de sacarosa ya que el vapor con mezcla afecta los alabes de la turbina.
3. Los cojinetes y chumaceras de apoyo siempre deben estar alineados.
4. Los dispositivos del regulador de velocidad deben estar siempre aceptables y lubricados, porque el regulador es el control de operación de la turbina. Fallando este equipo puede embalsarse la turbina.

C) Evaporadores

1. Sus niveles de jugo, de vapor y agua, teniendo mucho cuidado con las presiones de trabajo de vapor.
2. Mantenimiento cada 15 días que consiste en hervir soda para descalcificar las incrustaciones que se dan durante las operaciones de molienda.
3. Se mantiene un brix de 65% para evitar que entre sacarosa en los condensados del gua de deposición que va a las calderas.
4. Válvulas de seguridad que estén activas y operativas.
5. Válvulas de operación deben estar herméticamente sellado.

D) Buena práctica en Bombas.

1. Que el fluido sea agua y no tenga mezcla.
2. En el momento de operación de la bomba se verifica que sus niveles de aceite estén en el nivel establecido.
3. Debe tener una operación de trabajo de 500 PSI.
4. Mantenimiento periódico de 15 a 20 días donde se revisa rodamientos, empaquetaduras para evitar la salida del agua, impulsores, alineamiento, motor bomba, deflexión del eje de la bomba.

E) Buenas prácticas para toda la planta.

1. Limpieza y orden en toda el área de trabajo.
2. Capacitación a cada uno de los trabajadores para que entiendas mejor cada actividad que hacen.
3. Buen clima laboral entre trabajadores, ingenieros y ejecutivos.

4. Revisar periódicamente todo el sistema producción para prevenir fallas o averías en los equipos.

4.1.5 Balance económico para incrementar la eficiencia térmica.

Tabla 4.28 Balance económico para incrementar la eficiencia térmica

ITEM	BUENA PRÁCTICA	S/. COSTO	Nº	S/. TOTAL
1	Charlas de mantenimiento preventivo	200	4	800
2	Charlas para mejorar el desempeño del personal	200	4	800
3	Ventiladores para mantener el exceso de aire	400	5	2000
4	Aislamiento para la tubería de transporte del vapor	2000	1	2000
5	Mejoramiento del secado del bagazo	10	30	300
TOTAL		S/. 5900.00		

Fuente: propia.

4.2 Discusión de resultados.

En las investigaciones realizadas en muchos países como Argentina, Colombia, España y otros más, se discute mucho el tema de la exergía se busca saber cuánta energía están utilizando las máquinas y cuanta energía que puede recuperar de la que ahora no se utiliza.

Se puede ver que en los resultados de los cálculos que al trabajar con el método exergético da resultados más precisos, el método exergético es una herramienta muy valiosa a tener en cuenta al momento que hacer un análisis en las máquinas como en las calderas, turbinas, bombas, turbogeneradores, etc.

Los resultados obtenidos en la investigación realizada en el ciclo de potencia de vapor de la empresa agroindustrial Pucalá S.A.A son de suma importancia ya que nos indican el estado actual de las máquinas que conforman este ciclo, la eficiencia exergética de cada máquina muestra cuanta energía se aprovechada. Si además de estos cálculos nos ayudándonos de inspecciones visuales de las máquinas se puede nombrar prácticas para incrementar el nivel de aprovechamiento de energía que las máquinas pueden usar, ya sea por descuido de los ingenieros, por falta de preparación del personal de trabajo, por antigüedad de las máquinas, etc. Ahora no se están aplicando las buenas prácticas que nos permitirían incrementar la eficiencia tanto térmica como la de producción de la empresa.

A raíz de la investigación realizada en este ingenio azucarero se aplica un método de cálculo que es poco utilizado por las empresas de estas zonas del Perú el tema de exergía es muy utilizado en otros países ya que es mucha ayuda cuando se quiere obtener resultados precisos.

Con los resultados obtenidos se puede cumplir con los objetivos planteados en el proyecto, ya que nos sirven como base para poder generar una serie de prácticas para incrementar la eficiencia térmica de la empresa agroindustrial Pucalá S.A.A.

CAPÍTULO V.

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1 Conclusiones.

- Realizando el balance térmico del sistema de potencia de vapor encontramos que la fábrica trabaja con una potencia de generación de las turbinas de 4.54 MW y la eficiencia del ciclo es de 21.22 %, lo razonable para la empresa es mantener una eficiencia entre de 25% a 30%.
- Hay muchas formas y métodos para mejorar la eficiencia de un ciclo de potencia de vapor pero no todos formas y/o prácticas son aplicables para la empresa ya que son muy costosas o son difíciles de aplicar.
- Los software como el Excel o el e.g, MATLAB ®, son herramientas de mucha utilidad al momento de hacer los cálculos matemáticos, con la ayuda de estos programas se pudo calcular y comparar el incremento del rendimiento exergético de 24.523% a 29.83% y la eficiencia térmica de 21.22 a 25.13.
- Para incrementar la eficiencia térmica del ciclo de potencia de vapor se tiene implementar un sistema de buenas prácticas para reducir las pérdidas en las calderas , la temperatura y presiones de llegada a la turbina no diste mucho a los de salida de la caldera (reducir las pérdidas en las tuberías), mantener una temperatura promedio 550 °C en la salida de la caldera con eso ya tendríamos un mejoramiento de la eficiencia en el ciclo, el grupo de buenas prácticas son especificadas en el capítulo 4.

5.2 Recomendaciones.

- Mejorar las condiciones de vapor vivo a una presión y temperatura mínima de 30 bar y 550 °C, favorecerá la eficiencia térmica energética de todo el sistema.
- Disminuir lo más que se puede las pérdidas por humedad del bagazo
- Una de las pérdidas que es muy influyente en la eficiencia es la que se da en las tuberías es necesario reducir al máximo estas perdidas
- Implementar los medidores de vapor para un control de la eficiencia, Implementar un control de análisis de gases de combustión.
- Utilizar aguas condensadas, para alimentación de las calderas de alta calidad y con adecuado tratamiento
- Usar el método exergético como herramienta de cálculo ya que no es muy complicado y es de mucha ayuda al momento de calcular de manera detallada el rendimiento del ciclo de potencia de vapor.
- Implementar las buenas practicas mencionada para aprovechar la mayor cantidad de energía disponible en un proceso ya sea térmico, mecánico, eléctrico, etc ya que al aprovechar mejor la energía se obtiene más ganancias ya sea económicas y contribución en la reducción de gases contaminantes.

BIBLIOGRAFÍA

- A. Babich, L. García, J. Vega, A. Formoso, A. Cores. (31 de Mayo de 1998). <http://revistademetalurgia.revistas.csic.es/index.php/revistademetalurgia/index>. Recuperado el 22 de Mayo de 2015, de <http://revistademetalurgia.revistas.csic.es/index.php/revistademetalurgia/index>: <http://revistademetalurgia.revistas.csic.es/index.php/revistademetalurgia/article/view/728/740>
- A. V. Chamchine, G. M. Makhviladze, O. G. Vorobyev. (15 de Abril de 2006). *revistavirtualpro*. Recuperado el 24 de Mayo de 2015, de <http://www.revistavirtualpro.com/>: <http://www.revistavirtualpro.com/descarga/indicadores-de-exergia-de-calidad-ambiental>
- Arroyave, et al. (2004). Analisis energetico y exergetico en una torre de destilacion. En e. a. Arroyave, *Analisis energetico y exergetico en una torre de destilacion* (págs. 49-60). Medellin, Medellin, Colombia: Energetica.
- Ayres, et al. (2003). Exergy, power and work in the Us economy, 1900 to 1998. En e. a. Ayres, *Exergy, power and work in the Us economy, 1900 to 1998* (págs. 219-273). Energy, Vol 28,.
- Ayres, R. y Miller, S. (1980). The role of technical chance. En R. y. Ayres, *The role of technical chance* (págs. 353-371). Journal of environmental Economics and Management.
- Ayres, R. y Nair, I. (1984). Thermodynamics and economics. Physics Today.
- Benedict, M. y Gyftopoulos, E. (1949). Economic selection of the componets of an air separation process. En M. y. Benedict, *Economic selection of the componets of an air separation process* (págs. 195-203). Washington D.C.
- Bosnjakovic, F. (1967). Technische Thermodynamik. *Technische Thermodynamik*. Dresden, T. Steinkopff.
- Botero, E. (2000). Valoracion economica de recursos naturales, minerales, agua y combustibles fosiles. *Valoracion economica de recursos naturales, minerales, agua y combustibles fosiles*. Universidad de

Zaragoza, España: Tesis Doctoral.

Carrillo, G., et al. (2007). Enfoque exergetico para la optimizacion del uso de la energia en la industria. *Revista Ion*.

Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2009). Termodinámica. En Y. A. Cengel, & M. A. Boles, *Termodinámica* (págs. 563-599). Mc Graw-Hill/Interamericana Editores, S.A de C.V.

Chanampa, C. N. (09 de Noviembre de 2010). ANÁLISIS ENERGÉTICO DE UN SISTEMA DE COGENERACIÓN CON CICLO COMBINADO Y GASIFICACIÓN PARA LA INDUSTRIA AZUCARERA. *DE COGENERACIÓN CON CICLO COMBINADO Y GASIFICACIÓN PARA LA INDUSTRIA AZUCARERA*. Piura, Piura, Piura: Tesis.

Cuadra, C. T. (1 de Julio de 1991). Exergoeconomía Simbólica Metodología Para El Analisis Termodinámico De Los Sistemas Energéticos. *Exergoeconomía Simbólica Metodología Para El Analisis Termodinámico De Los Sistemas Energéticos*. Zaragoza, Zaragoza, España: Tesis.

Dora Paz y Gerónimo J. Cárdenas. (2005). Valoración Económica De Las Pérdidas De exergía De Las Operaciones. *Revista Industrial y Agrícola de Tucumán*, 16.

Dr. Víctor Samuel Ocaña Guevara, Dr. Candido Quintana Pérez, Dr. Jo Dewulf, Dr. Pablo Roque Díaz. (2008). Procedimiento para la valoración de la sostenibilidad energético ambiental de estrategias energéticas. *Procedimiento para la valoración de la sostenibilidad energético ambiental de estrategias energéticas*. Santa clara, Villa Clara, Cuba: UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS.

Faber, et al. (1987). Entropy, Enviroment and Resources. "*Entropy, Enviroment and Resources*. Heidelberg,, Estados Unidos.

Garrido, S. G. (2009). Mantenimiento Correctivo . *renovetec*, 28.

Georgescu-roegen. (1971). The Entropy law and the economic process. *The Entropy law and the economic process*. London, England: Harvard University.

Gonzales del Regueral, B. (2003). Analisis exergetico y Evaluacion

termoeconómica de un ciclo combinado de generación de energía eléctrica. *Analisis exergetico y Evaluacion termoeconómica de un ciclo combinado de generación de energía eléctrica*. Madrid, Madrid, España: Tesis de grado,.

google.com. (s.f.). *ubicación de la empresa agronindustrial pucalá*. Chiclayo: google.com.

Gouy, L. G. (1889). Sur L'Energie Utilizable.(On utilisable Energye)". En L. G. Gouy, "*Sur L'Energie Utilizable.(On utilisable Energye)*". (págs. 501-518). Francia: Journal of Physique.

José. A Sotolongo Pérez, Rafael Almares Arceo, Carlos Blanco Laborí. (s.f.). *¿Qué necesitamos: energía o exergía?* Recuperado el 26 de Mayo de 2015, de CubaSolar: <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia20/HTML/articulo08.htm>

Juan Eceda Martínez, V. S. (2013). *Guía Básica de Calderas Industriales Eficientes*. Madrid: Gráficas Arias Montano,S.A.

Keenan, J. (1932). A Steam Chart for Second Law Analysis. En J. Keenan, *A Steam Chart for Second Law Analysis* (págs. 195-204). Mech eng.

Kestin, J. (1980). Availability: the concept and associated terminology". vol 5. En J. Kestin, *Availability: the concept and associated terminology vol 5* (págs. 679 - 692).

Kotas, T. J. (1986). Exergy method of thermal and chemical plant analysis. *Chem. Eng.*

Liu, Y. y Wepfer W. (1983). Second law analysis of processes. En Y. y. Liu, *Second law analysis of processes* (págs. 415-446). Whashington: Efficiency and Costing ACS Symp series No 235.

Martín Hernández J.J, González Petit Jean, Mestizo Calderón J.R. (25 de Octubre de 2007). APLICACIÓN DEL MÉTODO EXERGÉTICO PARA DETERMINAR PÉRDIDAS SEPARADAS E IRREVERSIBILIDADES EN CALDERAS BAGACERAS. *APLICACIÓN DEL MÉTODO EXERGÉTICO PARA DETERMINAR PÉRDIDAS SEPARADAS E IRREVERSIBILIDADES EN CALDERAS BAGACERAS*. Veracruz , Veracruz , Mexico: 8º

Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica .

- Marulanda, M. R. (2003). Exergía: Una Oportunidad Para El Desarrollo Tecnológico. *CINTEX*, 40.
- Michael J. Moran y Howard N. Shapiro. (2004). Fundamentos De termodinámica Técnica. En M. J. Shapiro, *Fundamentos De termodinámica Técnica* (págs. 201-361). Barcelona, Bogotá, Buenos Aires, Caracas, México: REVERTÉ,S.A.
- Orellana, A., et al. (2009). Analisis exergetico de bienes y equipos". : Barcelona escuela tecnica superior de ingenierias. Congreso.
- Paz, D. A. (2012). Metodología de Análisis Exergético a las Plantas de Potencia de Ciclos Combinados Gas - Vapor . *Metodología de Análisis Exergético a las Plantas de Potencia de Ciclos Combinados Gas - Vapor* . Lambayeque, Lambayeque, Lambayeque: Tesis.
- Rant y Zoran. (1956). Exergy a new word for Technical Available Work. *Forschung auf dem gebiete des ingenieurwesens*, 36-37.
- Rein, P. (2012). *Ingeniería De La Caña De Azúcar*. Berlin: Verlag. Dr. Albert Bartens KG.
- Rodriguez Peña, D., et al. (2008). Analisis energetico-exergetico de calderas pirotubulares. *Innovacion Tecnologica*.
- Roegen, N. g. (1 de Enero de 1986). *jstor.org*. Recuperado el 05 de Junio de 2015, de http://www.jstor.org/stable/40357380?seq=1#page_scan_tab_contents
- Ruth, M. (1993). Integrating Economics, Ecology and Thermodynamics. *Integrating Economics, Ecology and Thermodynamics*. Ecology, Economy & Environment Academic Publishers, Vol 3,.
- Serrano, M. A. (Septiembre de 1987). Metodología Para El Analisis Exergético De Calderas De Calor En Centrales Termicas. *Metodología Para El Analisis Exergético De Calderas De Calor En Centrales Termicas*. Zaragoza, Zaragoza, España: Tesis.
- Stodola, A. y Lowenstein L. (1910). Steam and Gas Turbines. New York, Estados Unidos: McGraw Hill.

- Szargut, J. (1980). Internacional progress in second law analysis. En J. Szargut, *Internacional progress in second law analysis* (págs. 709-718). Energy.
- Tsatsaronis, G. (1987). Review of exergoeconomics Methodologies". *Roma, Vol. IV internacional symposium of second law analysis of thermal systems*,. Roma.
- Valle, L. M. (2014). Análisis energético y exergético de la implementación del ciclo combinado en la central térmica de –santa Rosa. *Análisis energético y exergético de la implementación del ciclo combinado en la central térmica de –santa Rosa*. Lima, Perú: Monografía.
- Von Spakovsky, M. (1986). A practical generalized analysis approach to the optimal thermoeconomic design and improvement of real worl termal systems. *A practical generalized analisis approach to the optimal thermoeconomic design and improvement of real worl termal systems*. Georgia institud of thecnology, Atlanta: Ph D Tesis.
- Wepfer, W. J. (1979). Application of the second law to the analysis of energy systems. *Application of the second law to the analysis of energy systems*. Madison, Wisconsin, Estados Unidos: Ph.D Tesis.
- www.google.com. (s.f.). *web*.
- www.google.com. (s.f.). *Eficiencia Térmica*.
- www.google.com. (s.f.). *Incremento*.
- Yeimmy Peralta, Eduardo Sanchez, Viatcheslav Kafarov. (10 de Marzo de 2012). *revistavirtualpro*. Recuperado el 24 de Mayo de 2015, de <http://www.revistavirtualpro.com/>:
<http://www.revistavirtualpro.com/descarga/analisis-de-exergia-para-la-produccion-de-biocombustibles-de-tercera-generacion-a-partir-de-biomasa-de-microalgas>

ANEXOS

PROGRAMA MATLAB.

```
% EFIXER - Programa que calcula eficiencia exergética de la Caldera, Turbina
y Bomba
% Por : Esquèn Arana Bryan y Yave Soto Benetti
% Al : 15/03/16
% -----
clc, clear all, close all
% INICIALIZACION DE VARIABLES
rpta=1;
while rpta==1
    % MENU DE SELECCION PARA ESCOGER ENTRE CALDERA, TURBINA O BOMBA
    caso = menu('Escoja el caso', 'Caldera', 'Turbina', 'Bomba');
    switch caso
        case 1 % CALDERA
            he = input('Ingrese entalpía de entrada en Btu/lbm (he) : ');
            hs = input('Ingrese entalpía de salida en Btu/lbm (hs) : ');
            Se = input('Ingrese entropía de entrada en BTU/lbm.R (Se) : ');
            Ss = input('Ingrese entropía de salida en BTU/lbm.R (Ss) : ');
            To = input('Ingrese temperatura de entrada en Fahrenheit (To) : ');
            ');
            m = input('Ingrese flujo de vapor generado en Lb/h (mv) : ');
            mb = input('Ingrese flujo de vapor del combustible con que se
alimenta en Lb/h (mb) : ');
            eb = input('Ingrese poder calorífico superior del combustible en
BTU/lb (eb) : ');
            y = hs-he-(To*(Ss-Se));
            E = (mv*y*100)/(mb*eb);
            % MOSTRAR RESULTADOS
            % Eficiencia Exergética
            disp(['E = ', num2str(E), ' %']);
        case 2 % TURBINA
            h1 = input('Ingrese entalpía de entrada en KJ/Kg (h1) : ');
            hu = input('Ingrese entalpía del ambiente en KJ/Kg (hu) : ');
            S1 = input('Ingrese entropía de entrada en KJ/Kg.K (S1) : ');
            Su = input('Ingrese entropía del ambiente en KJ/Kg.K (Su) : ');
            Tu = input('Ingrese temperatura ambiente en Kelvin (Tu) : ');
            m = input('Ingrese flujo de vapor en Kg/s (m) : ');
            P = input('Ingrese Potencia de la turbina en kilo Watt (P) : ');
            PG = m*((h1-hu)-(Tu*(S1-Su)));
            E = (P*100)/PG;
            % MOSTRAR RESULTADOS
            % Eficiencia Exergética
            disp(['E = ', num2str(E), ' %']);
        case 3 % BOMBA
            h1 = input('Ingrese entalpía de entrada en KJ/Kg (h1) : ');
            h2 = input('Ingrese entalpía de salida en KJ/Kg (h2) : ');
            S1 = input('Ingrese entropía de entrada en KJ/Kg.K (S1) : ');
            S2 = input('Ingrese entropía de salida en KJ/Kg.K (S2) : ');
            To = input('Ingrese temperatura ambiente en Kelvin (To) : ');
            Wb = h2-h1;
            e = (h2-h1)-(To*(S2-S1))
            E = (e*100)/Wb;
            % MOSTRAR RESULTADOS
            % Rapidez de transferencia de calor
            disp(['E = ', num2str(E), ' %']);
        otherwise
            end
    rpta=input('Desea seguir usando el programa (1(SI) o 0(NO)) : ');
end
```

TABLAS:
Vapor y Agua Saturado (Según la temperatura)

Temp (°C)	Presión (bar)	v' (m³/kg)	v'' (m³/kg)	h' (kJ/kg)	h'' (kJ/kg)	s' (kJ/kgK)	s'' (kJ/kgK)
0.01	0.0061120	0.0010002	206.2	0	2501.6	0	9.1575
1.0000	0.0065709	0.0010001	192.44	4.1767	2502.7	0.015260	9.1291
2.0000	0.0070599	0.0010001	179.76	8.3918	2504.6	0.030607	9.1027
3.0000	0.0075808	0.0010001	168.01	12.604	2506.4	0.045888	9.0765
4.0000	0.0081355	0.0010001	157.12	16.813	2508.2	0.061103	9.0505
5.0000	0.0087258	0.0010001	147.01	21.020	2510.1	0.076254	9.0248
6.0000	0.0093536	0.0010001	137.63	25.224	2511.9	0.091342	8.9993
7.0000	0.010021	0.0010001	128.92	29.426	2513.7	0.10637	8.9741
8.0000	0.010730	0.0010002	120.83	33.627	2515.6	0.12133	8.9491
9.0000	0.011483	0.0010003	113.30	37.825	2517.4	0.13624	8.9243
10.000	0.012282	0.0010003	106.30	42.021	2519.2	0.15109	8.8998
11.000	0.013130	0.0010004	99.787	46.216	2521.0	0.16587	8.8754
12.000	0.014028	0.0010005	93.719	50.409	2522.9	0.18061	8.8513
13.000	0.014981	0.0010007	88.064	54.601	2524.7	0.19528	8.8274
14.000	0.015990	0.0010008	82.793	58.792	2526.5	0.20990	8.8037
15.000	0.017058	0.0010009	77.875	62.981	2528.3	0.22446	8.7803
16.000	0.018188	0.0010011	73.286	67.170	2530.2	0.23897	8.7570
17.000	0.019384	0.0010013	69.001	71.357	2532.0	0.25343	8.7339
18.000	0.020647	0.0010014	64.998	75.544	2533.8	0.26783	8.7111
19.000	0.021983	0.0010016	61.256	79.729	2535.6	0.28218	8.6884
20.000	0.023393	0.0010018	57.757	83.914	2537.4	0.29648	8.6660
21.000	0.024882	0.0010021	54.483	88.098	2539.3	0.31073	8.6437
22.000	0.026453	0.0010023	51.418	92.282	2541.1	0.32493	8.6217
23.000	0.028111	0.0010025	48.548	96.465	2542.9	0.33908	8.5998
24.000	0.029858	0.0010028	45.858	100.65	2544.7	0.35318	8.5781
25.000	0.031699	0.0010030	43.337	104.83	2546.5	0.36722	8.5566
26.000	0.033639	0.0010033	40.973	109.01	2548.3	0.38123	8.5353
27.000	0.035681	0.0010035	38.754	113.19	2550.1	0.39518	8.5142
28.000	0.037831	0.0010038	36.672	117.37	2551.9	0.40908	8.4933
29.000	0.040092	0.0010041	34.716	121.55	2553.7	0.42294	8.4725
30.000	0.042470	0.0010044	32.878	125.73	2555.5	0.43675	8.4520
31.000	0.044969	0.0010047	31.151	129.91	2557.3	0.45052	8.4316
32.000	0.047596	0.0010050	29.526	134.09	2559.2	0.46424	8.4113
33.000	0.050354	0.0010054	27.998	138.27	2561.0	0.47792	8.3913
34.000	0.053251	0.0010057	26.560	142.45	2562.8	0.49155	8.3714
35.000	0.056290	0.0010060	25.205	146.63	2564.5	0.50513	8.3517
36.000	0.059479	0.0010064	23.929	150.81	2566.3	0.51867	8.3321
37.000	0.062823	0.0010068	22.727	154.99	2568.1	0.53217	8.3127
38.000	0.066328	0.0010071	21.593	159.17	2569.9	0.54562	8.2935
39.000	0.070002	0.0010075	20.524	163.35	2571.7	0.55903	8.2745
40.000	0.073849	0.0010079	19.515	167.53	2573.5	0.57240	8.2555
41.000	0.077878	0.0010083	18.563	171.71	2575.3	0.58573	8.2368
42.000	0.082096	0.0010087	17.664	175.89	2577.1	0.59901	8.2182
43.000	0.086508	0.0010091	16.814	180.07	2578.9	0.61225	8.1998
44.000	0.091124	0.0010095	16.011	184.25	2580.6	0.62545	8.1815
45.000	0.095950	0.0010099	15.252	188.43	2582.4	0.63861	8.1633
46.000	0.10099	0.0010104	14.534	192.62	2584.2	0.65173	8.1453
47.000	0.10627	0.0010108	13.855	196.80	2586.0	0.66481	8.1275
48.000	0.11177	0.0010112	13.212	200.98	2587.8	0.67785	8.1098
49.000	0.11752	0.0010117	12.603	205.16	2589.5	0.69085	8.0922

		P=16 bar		Ts _{sat} =201.37°C	
T (°C)		v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg*K)
Tsat		0,12374	2594,8	2792,8	6,4199
225		0,13293	2645,1	2857,8	6,5537
250		0,14190	2692,9	2919,9	6,6753
300		0,15866	2781,6	3035,4	6,8863
350		0,17459	2866,6	3146,0	7,0713
400		0,19007	2950,7	3254,9	7,2394
500		0,22029	3120,1	3472,6	7,5409
600		0,24999	3293,9	3693,9	7,8100
700		0,27940	3473,5	3920,5	8,0557
800		0,30865	3659,5	4153,3	8,2834
900		0,33780	3852,1	4392,6	8,4965
1000		0,36687	4051,2	4638,2	8,6974
1100		0,39580	4253,7	4887,0	8,8837
1200		0,42480	4464,2	5143,9	9,0643
1300		0,45380	4679,9	5406,0	9,2364

		P=18 bar		Ts _{sat} =207.11°C	
T (°C)		v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg*K)
Tsat		0,11037	2597,2	2795,9	6,3775
225		0,11678	2637,0	2847,2	6,4824
250		0,12502	2686,7	2911,7	6,6087
300		0,14025	2777,4	3029,9	6,8246
350		0,15460	2863,6	3141,8	7,0120
400		0,16849	2948,3	3251,6	7,1814
500		0,19551	3118,5	3470,4	7,4845
600		0,22200	3292,7	3692,3	7,7543
700		0,24821	3472,6	3919,4	8,0004
800		0,27426	3658,8	4152,4	8,2284
900		0,30020	3851,5	4391,9	8,4416
1000		0,32606	4050,7	4637,6	8,6426
1100		0,35180	4253,2	4886,4	8,8290
1200		0,37760	4463,7	5143,4	9,0096
1300		0,40340	4679,5	5405,6	9,1818

		P=20 bar		Ts _{sat} =212.38°C	
T (°C)		v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg*K)
Tsat		0,09959	2599,1	2798,3	6,3390
225		0,10381	2628,5	2836,1	6,4160
250		0,11150	2680,2	2903,2	6,5475
300		0,12551	2773,2	3024,2	6,7684
350		0,13860	2860,5	3137,7	6,9583
400		0,15121	2945,9	3248,3	7,1292
500		0,17568	3116,9	3468,2	7,4337
600		0,19961	3291,5	3690,7	7,7043
700		0,22326	3471,6	3918,2	7,9509
800		0,24674	3658,0	4151,5	8,1790
900		0,27012	3850,9	4391,1	8,3925
1000		0,29342	4050,2	4637,0	8,5936
1100		0,31660	4252,7	4885,9	8,7800
1200		0,33980	4459,3	5142,9	8,9607
1300		0,36310	4679,0	5405,1	9,1329

		P=25 bar		Ts _{sat} =223.95°C	
T (°C)		v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg*K)
Tsat		0,07994	2602,1	2801,9	6,2558
225		0,080260	2604,8	2805,5	6,2629
250		0,087053	2663,3	2880,9	6,4107
300		0,098937	2762,2	3009,6	6,6459
350		0,109790	2852,5	3127,0	6,8424
400		0,120120	2939,8	3240,1	7,0170
500		0,130150	3026,2	3351,6	7,1767
600		0,139990	3112,8	3462,7	7,3254
700		0,159310	3288,5	3686,8	7,5979
800		0,178350	3469,3	3915,2	7,8455
900		0,197210	3656,2	4149,2	8,0743
1000		0,215970	3849,4	4389,3	8,2882
1100		0,234660	4048,9	4635,6	8,4896
1200		0,253200	4251,5	4884,6	8,6762
1300		0,271800	4462,1	5141,7	8,8569

		P=30 bar		Ts _{sat} =233.85°C	
T (°C)		v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg*K)
Tsat		0,06666	2603,2	2803,2	6,1856
225					
250		0,07063	2644,7	2856,5	6,2893
300		0,08118	2750,8	2994,3	6,5412
350		0,09056	2844,4	3116,1	6,7449
400		0,09938	2933,5	3231,7	6,9234
500		0,10789	3021,2	3344,8	7,0856
600		0,11620	3108,6	3457,2	7,2359
700		0,13245	3285,5	3682,8	7,5103
800		0,14841	3467,0	3912,2	7,7590
900		0,16420	3654,3	4146,9	7,9885
1000		0,17988	3847,9	4387,5	8,2028
1100		0,19549	4047,7	4634,1	8,4045
1200		0,21098	4250,3	4883,3	8,5912
1300		0,22652	4460,9	5140,5	8,7720
		0,24206	4676,6	5402,8	8,9442

		P=35 bar		Ts _{sat} =242.86°C	
T (°C)		v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg*K)
Tsat		0,05706	2602,9	2802,6	6,1243
225					
250		0,05876	2624,0	2829,7	6,1764
300		0,06845	2738,8	2978,4	6,4484
350		0,07680	2836,0	3104,8	6,6601
400		0,08456	2927,2	3223,2	6,8427
500		0,09198	3016,1	3338,0	7,0074
600		0,09920	3104,5	3451,6	7,1593
700		0,11325	3282,5	3678,9	7,4356
800		0,12702	3464,7	3909,3	7,6854
900		0,14061	3652,5	4144,6	7,9156
1000		0,15410	3846,4	4385,7	8,1303
1100		0,16751	4046,4	4632,7	8,3324
1200		0,18080	4249,2	4881,9	8,5192
1300		0,19415	4459,8	5139,3	8,7000
		0,20749	4675,5	5401,7	8,8723

P=250 bar

T (°C)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg*K)
375	0,001978	1799,9	1849,4	4,0344
400	0,006005	2428,5	2578,6	5,1400
425	0,007886	2607,8	2805,0	5,4707
450	0,009176	2721,2	2950,6	5,6759
500	0,011143	2887,3	3165,9	5,9642
550	0,012736	3020,8	3339,2	6,1816
600	0,014140	3140,0	3493,5	6,3637
650	0,015430	3251,9	3637,7	6,5242
700	0,016643	3359,9	3776,0	6,6702
800	0,018922	3570,7	4043,8	6,9322
900	0,021075	3780,2	4307,1	7,1668
1000	0,023150	3991,5	4570,2	7,3820
1100	0,025120	4200,2	4828,2	7,5765
1200	0,025120	4412,0	5089,9	7,7605
1300	0,029100	4626,9	5354,4	7,9342

P=300 bar

v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg*K)
0,001792	1738,1	1791,8	3,9313
0,002798	2068,9	2152,8	4,4757
0,005299	2452,8	2611,8	5,1473
0,006737	2618,9	2821,0	5,4421
0,008690	2824,0	3084,7	5,7956
0,010175	2974,5	3279,7	6,0402
0,011445	3103,4	3446,7	6,2373
0,012589	3221,7	3599,4	6,4074
0,013653	3334,3	3743,9	6,5598
0,015628	3551,2	4020,0	6,8300
0,017473	3764,6	4288,8	7,0695
0,019240	3978,6	4555,8	7,2880
0,020903	4189,2	4816,3	7,4845
0,022589	4401,3	5079,8	7,6692
0,024266	4616,0	5344,0	7,8432

P=350 bar

v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg*K)
0,001701	1702,8	1762,4	3,8724
0,002105	1914,9	1988,6	4,2143
0,003434	2253,3	2373,4	4,7751
0,004957	2497,5	2671,0	5,1945
0,006933	2755,3	2997,9	5,6331
0,008348	2925,8	3218,0	5,9092
0,009523	3065,6	3398,9	6,1228
0,010565	3190,9	3560,7	6,3030
0,011523	3308,3	3711,6	6,4622
0,013278	3531,5	3996,3	6,7409
0,014904	3748,9	4270,6	6,9853
0,016450	3965,8	4541,5	7,2069
0,017895	4178,3	4804,6	7,4057
0,019360	4390,7	5068,3	7,5910
0,020815	4605,1	5333,6	7,7653

P=400 bar

T (°C)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg*K)
375	0,001641	1677,0	1742,6	3,8290
400	0,001911	1854,9	1931,4	4,1145
425	0,002538	2097,5	2199,0	4,5044
450	0,003692	2364,2	2511,8	4,9448
500	0,005623	2681,6	2906,5	5,4744
550	0,006985	2875,0	3154,4	5,7857
600	0,008089	3026,8	3350,4	6,0170
650	0,009053	3159,5	3521,6	6,2078
700	0,009930	3282,0	3679,1	6,3740
800	0,011521	3511,8	3972,6	6,6612
900	0,012980	3733,3	4252,5	6,9106
1000	0,014360	3952,9	4527,3	7,1355
1100	0,015642	4167,4	4793,1	7,3365
1200	0,016940	4380,1	5057,7	7,5224
1300	0,018229	4594,3	5323,5	7,6969

P=500 bar

v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg*K)
0,001560	1638,6	1716,6	3,7642
0,001731	1787,8	1874,4	4,0029
0,002009	1960,2	2060,7	4,2746
0,002487	2160,3	2284,7	4,5896
0,003890	2528,1	2722,6	5,1762
0,005118	2769,5	3025,3	5,5563
0,006108	2947,1	3252,5	5,8245
0,006957	3095,6	3443,4	6,0373
0,007717	3228,7	3614,6	6,2178
0,009072	3472,2	3925,8	6,5225
0,010296	3702,0	4216,8	6,7819
0,011441	3927,3	4499,4	7,0131
0,012496	4145,7	4770,5	7,2184
0,013561	4359,1	5037,2	7,4058
0,014616	4572,8	5303,6	7,5808

P=600 bar

v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg*K)
0,001503	1609,7	1699,9	3,7149
0,001633	1745,2	1843,2	3,9317
0,001816	1892,9	2001,8	4,1630
0,002086	2055,1	2180,2	4,4140
0,002952	2393,2	2570,3	4,9356
0,003955	2664,5	2901,9	5,3517
0,004833	2866,8	3156,8	5,6527
0,005591	3031,3	3366,7	5,8867
0,006265	3175,4	3551,3	6,0814
0,007456	3432,6	3880,0	6,4033
0,008519	3670,9	4182,0	6,6725
0,009504	3901,9	4472,2	6,9099
0,010409	4124,1	4748,6	7,1195
0,011317	4338,2	5017,2	7,3083
0,012215	4551,4	5284,3	7,4837

