

**ANÁLISIS EXERGÉTICO DE LA PLANTA TÉRMICA DE LA UNIVERSIDAD
SANTO TOMÁS**

GIOVANI ESTEBAN SUÁREZ MARTÍN

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTA D.C
2021

ANÁLISIS EXERGÉTICO DE LA PLANTA TÉRMICA DE LA UNIVERSIDAD
SANTO TOMÁS

GIOVANI ESTEBAN SUÁREZ MARTÍN

Proyecto de trabajo de grado

Director

Ing. Oscar Mauricio Ochoa Álvarez

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTA D.C

2021

ACEPTACIÓN DEL TRABAJO DE GRADO

FECHA:

CIUDAD:

NOTA DE ACEPTACIÓN

FIRMA JURADO

FIRMA JURADO

FIRMA DIRECTOR

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de grado en primera instancia a Dios que ha sido mi guía durante todo el proceso de aprendizaje como ingeniero mecánico y seguido de ellos a mis padres y familiares que han estado de manera incondicional en este proceso, a mis compañeros de carrera y a todos los docentes que de manera muy cordial siempre estuvieron dispuestos a brindar el mejor aprendizaje.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todas las personas que estuvieron presentes con su apoyo durante el transcurso de este tiempo de experiencias y grandes aprendizajes, mis padres, mi familia, a todos los docentes que con su experiencia y conocimientos influyeron de manera positiva en mi crecimiento profesional y personal; al director del trabajo de grado Oscar Mauricio Ochoa quien con su disposición y apoyo ha sido parte importante para alcanzar esta meta y en general a la Universidad Santo Tomas y a la facultad de ingeniería mecánica por permitirme cumplir uno de los propósitos más importantes que tengo en mi vida.

1 RESUMEN

El estudio en pro de obtener resultados reales y óptimos acerca del comportamiento, funcionamiento y disponibilidad operativa por medio del cual se rigen los diferentes equipos que hacen parte de un ciclo térmico, hace que surjan fundamentaciones teóricas que apoyadas en procedimientos experimentales con llevan a la obtención de dichos resultados; mencionado esto; el presente trabajo realiza el análisis exergético de la planta térmica de la Universidad Santo Tomás. Esta consiste en un equipo didáctico donde los estudiantes que cursan materias pertenecientes al núcleo de termo fluidos reconocen y aplican los conocimientos teóricos adquiridos en las aulas con relación a un ciclo termodinámico Rankine. Dentro de las características con las que cuenta la planta, una de las más importantes es que permite la variación de la velocidad requerida en la turbina a partir del funcionamiento de un PLC central. Teniendo claro el principio de funcionamiento del sistema en estudio, cabe resaltar que en la actualidad no se cuenta con un estudio detallado de la capacidad de la planta y de sus rangos de operación, de tal forma que el docente pueda variar parámetros de entrada y conocer los valores de parámetros de salida esperados. Este es el punto donde nace la necesidad de realizar un estudio el cual permita obtener dicha información que al día de hoy no es conocida. Es por esto que en este trabajo se tomaron datos experimentales del funcionamiento de la planta a tres velocidades de giro de la turbina, y seguido de ello se procedió con un análisis fundamentado en la primera y segunda ley de la termodinámica. Partiendo de estos resultados se evidencian eficiencias térmicas por debajo del 5% y potencias generadas en la turbina del orden de 2 a 3 kW. Con base en los resultados obtenidos del análisis tanto de primera como de segunda ley se implementó el análisis exergético el cual permitió identificar que la principal fuente de irreversibilidades del sistema es el proceso de combustión en la caldera principalmente debido a que no se tiene un control de estado eficiente de equipos, seguido por los procesos de pérdidas de calor en la turbina y el condensador.

Palabras Clave: Exergía, análisis exergético, primera ley, segunda ley, planta térmica. irreversibilidad

2 ABSTRACT

The study in favor of obtaining real and optimal results about the behavior, operation and operational availability by means of which the different equipments that are part of a thermal cycle are governed, give rise to theoretical foundations that, supported by experimental procedures, lead to obtaining of said results; mentioned this; The present work carries out the exergy analysis of the thermal plant of the Santo Tomás University. This consists of a didactic equipment where students who take subjects belonging to the thermo-fluid core recognize and apply the theoretical knowledge acquired in the classrooms in relation to a Rankine thermodynamic cycle. Among the characteristics that the plant has, one of the most important is that it allows the variation of the speed required in the turbine from the operation of a central PLC. Having clear the principle of operation of the system under study, it should be noted that at present there is no detailed study of the capacity of the plant and its operating ranges, in such a way that the teacher can change the input parameters and know the expected output parameter values. This is the point where the need to carry out a study arises which allows obtaining such information that is not known today. This is why in this work experimental data were taken on the operation of the plant at three speeds of rotation of the turbine, and followed by an analysis based on the first and second laws of thermodynamics. Based on these results, thermal efficiencies below 5% and powers generated in the turbine of the order of 2 to 3 kW are evidenced. Based on the results obtained from the analysis of both the first and second law, the exergy analysis was implemented which will include that the main source of irreversibility's of the system is the combustion process in the boiler, mainly because there is no state control efficient equipment, followed by heat loss processes in the turbine and condenser

Key Words: Exergy, exergetic analysis, first law, second law, thermal plant,

3 CONTENIDO

ANÁLISIS EXERGÉTICO DE LA PLANTA TÉRMICA DE LA UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS	1
1 RESUMEN.....	6
2 ABSTRACT.....	7
4 TABLA DE ILUSTRACIONES.....	11
5 INDICE DE TABLAS.....	12
6 TABLA DE ECUACIONES.....	14
7 NOMENCLATURA.....	15
8 INTRODUCCIÓN.....	16
9 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	19
10 OBJETIVOS	21
10.1 Objetivo general:	21
10.2 Objetivos específicos	21
11 MARCO TEÓRICO.....	22
11.1 ORIGEN DEL CONCEPTO EXERGÍA.....	22
11.1.1 ANÁLISIS HISTORICO DEL CONCEPTO DE EXERGÍA.....	23
12 MARCO CONCEPTUAL.....	24
12.1 EXERGÍA	24
12.1.1 EFICIENCIA EXERGÉTICA	24
12.1.2 EXERGIA DESTRUIDA.....	25
12.2 PRINCIPIOS TERMODINÁMICOS	25
12.2.1 ESTADO MUERTO	25
12.2.2 PRIMERA LEY DE LA TERMODINÁMICA.....	26
12.2.3 SEGUNDA LEY DE LA TERMODINÁMICA	26
12.2.4 BALANCE DE ENERGÍA.....	27
12.2.5 VOLUMEN DE CONTROL	27
12.2.6 IRREVERSIBILIDADES.....	27
12.2.7 BALANCE EXERGÉTICO	28
12.2.8 DIAGRAMAS PARA REPRESENTACION DE FLUJO EXERGÉTICO	
28	
13 ESTADO DEL ARTE	29

13.1	ANÁLISIS ENERGÉTICO, EXERGÉTICO Y ECONÓMICO DE UNA PLANTA GEOTERMICA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN ESPAÑA	29
13.2	ANÁLISIS EXERGÉTICO Y TERMOECOLOGICO DE UNA CALDERA ACUOTUBULAR DE BAGAZO Y DE CARBÓN EN UN INGENIO AZUCARERO DEL VALLE DEL CAUCA	32
13.3	APLICACIÓN DEL ANÁLISIS EXERGÉTICO A UNA INSTALACIÓN DE PRODUCCIÓN DE HIDROCARBUROS DE ECOPETROL S.A.	34
14	METODOLOGIA.....	36
14.1	GENERALIDADES.....	36
14.2	REGÍMENES DE TRABAJO	38
14.3	ANÁLISIS DE ENERGÍA	40
14.4	Análisis Exergético	42
14.4.1	Exergía de flujos	42
14.4.2	Exergías destruidas	42
14.5	Análisis Exergético del proceso de Combustión en la Caldera	45
14.5.1	Balance Molar de la composición del Diesel	46
14.5.2	Exergía de la combustión	47
15	RESULTADOS	50
15.1	GUIA DE PRACTICA DE LABORATORIO GENERADA.....	55
15.2	TITULO: PRACTICA DE LABORATORIO PLANTA TÉRMICA DE LA UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS (GUÍA)	55
15.3	OBJETIVO DE LA GUÍA (GUÍA)	55
15.4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS (GUÍA)	55
15.5	TEORÍA (GUÍA).....	55
15.5.1	Ciclo Rankine.....	56
15.6	PROCEDIMIENTO (GUIA)	58
15.7	ANÁLISIS EXERGÉTICO DE LA PLANTA (GUÍA)	62
15.8	ANÁLISIS DE RESULTADOS (GUÍA)	62
15.9	CONCLUSIONES (GUÍA)	62
16	BIBLIOGRAFIA.....	63
17	CONCLUSIONES	65
18	ANEXOS	67

18.1 TABLA DE PROPIEDADES PARA LOS DIFERENTES REGÍMENES DE TRABAJO	67
--	----

4 TABLA DE ILUSTRACIONES

Figura 1 Producción energética de Colombia.....	16
Figura 2 Sistema en equilibrio con los alrededores.....	26
Figura 3 Definición balance de energía.....	27
Figura 4 Esquema del ciclo termodinámico diseñado	30
Figura 5. Esquema del ciclo modelado y resultados obtenidos.....	31
Figura 6 Esquema del principio de la planta de estudio	32
Figura 7 Esquema del subsistema general de la caldera.....	33
Figura 8 Resultados del análisis exergético	33
Figura 9 Eficiencia exergética total.....	35
Figura 10 Vista isométrica de la planta	36
Figura 11 Diagrama de equipos de la planta térmica.....	37
Figura 12 Diagrama de equipos de la planta térmica	38
Figura 13 Diagrama temperatura – entropía del ciclo	39
Figura 14 Gráfica de potencia de salida contra velocidad de giro de la turbina. ...	53
Figura 15 Gráfica de eficiencia térmica contra velocidad de giro de la turbina.	53
Figura 16 Diagrama de Sankey.....	54
Figura 17 Vista isométrica de la planta	56
Figura 18 Diagrama de equipos de la planta térmica.....	57

5 INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Destrucciones exergéticas porcentuales de la planta	31
Tabla 2. Propiedades termodinámicas de los estados para 5000 RPM de velocidad de giro de la turbina.....	39
Tabla 3 Propiedades termodinámicas de los estados para 4000 RPM de velocidad de giro de la turbina.....	39
Tabla 4 Propiedades termodinámicas de los estados para 3000 RPM de velocidad de giro de la turbina.....	40
Tabla 5 Resultado de análisis de energía del ciclo	41
Tabla 6 Balance exergético régimen 5000 RPM.....	50
Tabla 7 Balance exergético régimen 4000 RPM.....	51
Tabla 8 Balance exergético régimen 3000 RPM.....	52
Tabla 9 Tabla de equipos de la planta térmica	56
Tabla 10 Tabla para diligenciamiento de información de temperatura y presión de los estados a determinada velocidad de giro	59
Tabla 11 Tabla de propiedades de los estados	59
Tabla 12 Tabla para diligenciamiento de información de temperatura y presión de los estados a determinada velocidad de giro	60
Tabla 13 Tabla de propiedades de los estados	60
Tabla 14 Tabla para diligenciamiento de información de temperatura y presión de los estados a determinada velocidad de giro	61
Tabla 15 Tabla de propiedades de los estados	61
Tabla 16 Exergía destruida en equipos para 5000 rpm	67
Tabla 17 Exergía destruida en equipos para 4000 rpm	67
Tabla 18 Exergía destruida en equipos para 3000 rpm	67
Tabla 19 Propiedades para el estado 1 y 5 – 5000 RPM – Software Termograf ..	68
Tabla 20 Propiedades para el estado 2 y 3 – 5000 RPM – Software Termograf ..	68
Tabla 21 Propiedades para el estado 4 y 6 – 5000 RPM – Software Termograf ..	69
Tabla 22 Propiedades para el estado 1 – Para 4000 y 3000 RPM – Software Termograf.....	69

Tabla 23 Propiedades para el estado 2 y 3 – Para 4000 y 3000 RPM – Software Termograf.....	70
Tabla 24 Propiedades para el estado 4 y 6 – Para 4000 y 3000 RPM – Software Termograf.....	70
Tabla 25 Propiedades para el estado 5 – Para 4000 y 3000 RPM – Software Termograf.....	70

6 TABLA DE ECUACIONES

Ecuación 1 Calor de entrada.....	40
Ecuación 2 Potencia de salida	41
Ecuación 3 Eficiencia térmica	41
Ecuación 4 Eficiencia isoentrópica.....	41
Ecuación 5 Exergía de flujo.....	42
Ecuación 6 Tasa de cambio de la exergía	42
Ecuación 7 Exergía destruida en la caldera.....	43
Ecuación 8 Exergía destruida – Estados 1 - 2	43
Ecuación 9 Exergía destruida en la turbina.....	43
Ecuación 10 Eficiencia de segunda ley de la turbina	44
Ecuación 11 Exergía destruida en el condensador	44
Ecuación 12 Exergía destruida en la bomba.....	44
Ecuación 13 Balance Molar de la Combustión con cantidad teórica de aire	46
Ecuación 14 Balance Molar de la Combustión con exceso de 50% de aire.....	46
Ecuación 15 Relación Aire / Combustible	46
Ecuación 16 Flujo másico del aire.....	47
Ecuación 17 Relación adimensional AC con LHV	47
Ecuación 18 Exergía del combustible	47
Ecuación 19 Exergía del agua y vapor de agua.....	48
Ecuación 20 Exergía Térmica de los gases de combustión.....	48
Ecuación 21 Exergía Presión de los gases de combustión.....	48
Ecuación 22 Exergía Química de los gases de combustión.....	49
Ecuación 23 Exergía Total de los gases de combustión	49
Ecuación 24 Exergía perdida por transferencia de calor.....	49
Ecuación 25 Exergía perdida por transferencia de calor.....	49

7 NOMENCLATURA

$\dot{Q}_{in}$ = Calor de entrada

$\dot{W}_{out}$ = Potencia de salida

$\dot{m}$ = Flujo másico

h_n = Entalpía

η = Eficiencia térmica

η_t = Eficiencia isoentrópica

T = Temperatura

P = Presión

ψ_n = Exergía de flujo

$\dot{Q}_k$ = Calor que entra o sale

$\dot{X}_d$ = Exergía destruida en el
volumen de control

P_0 = Presión atmosférica (Estado
muerto)

T_0 = Temperatura en el estado
muerto

η_{tt} = Eficiencia de segunda ley
en la turbina

$\bar{R}$ = Constante Universal de los
gases ideales

$\bar{g}_f^\circ$ = Energía Libre de Gibbs

X_i = Componente químico de los
gases de escape

h_0 = Entalpía en el estado muerto

S_0 = Entropía en el estado muerto

AC = Relación Aire/Combustible

LVH = Poder Calorífico Inferior

β_1 = Relación adimensional AC/LHV

S = Cantidad másica de azufre del
combustible

C_{pg} = Calor Específico de los gases
de combustión

n_i = Fracción Molar del componente
químico de los gases de escape

8 INTRODUCCIÓN

La generación de energía eléctrica a nivel mundial principalmente se obtiene por medio de procesos hidro eléctricos y de la utilización de ciclos termodinámicos de potencia que como principal característica tienen la conversión de calor en trabajo, el trabajo o potencia mecánica obtenida se convierte en energía eléctrica en el instante en que dicha potencia se utiliza para hacer funcionar un generador eléctrico.

A nivel mundial la producción de energía eléctrica está dada en su mayor parte por el aporte de las hidro eléctricas, sin embargo, la producción de energía eléctrica por medio de termo eléctricas no se queda atrás. En Colombia la energía producida por termoeléctricas está ubicada en un segundo puesto con un 29% de producción aproximadamente.

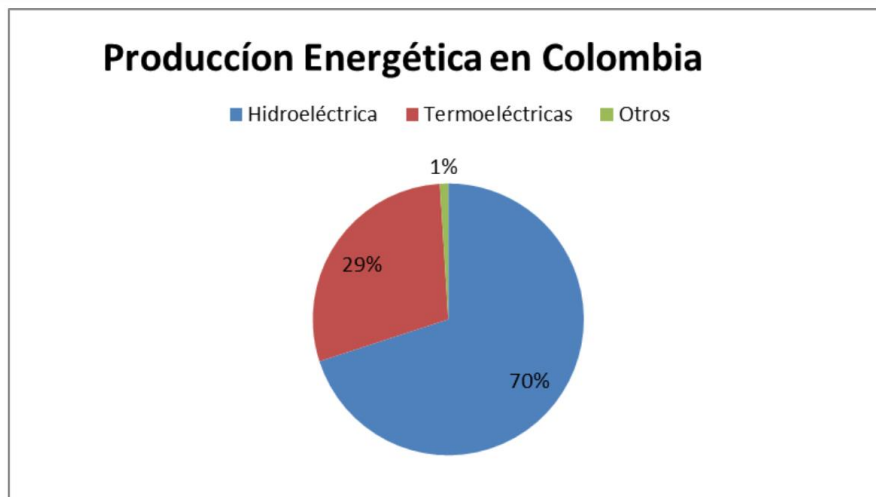


Figura 1 Producción energética de Colombia

Fuente: Diario Semana [1]

Referente a los ciclos termodinámicos más utilizados se pueden enunciar el ciclo Brayton donde la sustancia de trabajo permanece en fase gaseosa en todos los estados del ciclo. El ciclo Rankine, donde la sustancia de trabajo cambia entre fase líquida y fase vapor continuamente. A las plantas que utilizan estos tipos de ciclos se les conoce como plantas térmicas. Dichos principios básicos de funcionamiento son

independientes de la fuente de calor disponible, la cual puede ser proveniente de combustión de combustibles fósiles, radiaciones solares concentradas, decaimiento radiactivo de un isótopo pesado o un gradiente geotérmico, entre otros.

Para medir el desempeño de los ciclos térmicos de potencia existen diferentes parámetros entre los cuales uno de los que principalmente se emplea es la eficiencia térmica, la cual relaciona el trabajo neto producido y la entrada total de calor. Este parámetro solo tiene en cuenta la transformación de la energía, por lo que suele denominarse eficiencia de primera ley de la termodinámica. Sin embargo, según la segunda Ley de la termodinámica, ningún sistema térmico puede convertir totalmente calor en trabajo sin tener un desecho de calor sobrante, por lo que la eficiencia térmica nunca podrá ser igual a cien por ciento. La máxima eficiencia que puede lograr una maquina térmica entre dos temperaturas se conoce como eficiencia de Carnot.

Un análisis más profundo del desempeño del ciclo termodinámico debe tener en cuenta las irreversibilidades que se dan en los procesos. Para ello, se utiliza la propiedad denominada Exergía, la cual permite determinar el potencial de trabajo útil de una cantidad dada de energía en algún estado especificado. [2]. Un análisis exergético de los ciclos termodinámicos de potencia permite observar donde se están dando las principales irreversibilidades y, por lo tanto, donde realizar las mejoras en los equipos del sistema.

Este tipo de análisis se realiza ampliamente en proyectos de investigación tanto industriales como académicos, al día de hoy a nivel nacional, se han realizado una gran cantidad de análisis exegéticos de ciclos de cogeneración de los ingenios azucareros del Valle del Cauca, Sanz [3] muestra como este análisis permite identificar las irreversibilidades típicas en la transferencia de calor en la caldera. Sin embargo, también hace observaciones sobre irreversibilidades en turbinas, válvulas reductoras de vapor y termocompresores, los cuales pueden ser optimizados. Este tipo de análisis también ha sido aplicado a los sistemas internos de calderas de bagazo tal como lo realiza Echeverry [4], quien logra obtener un valor de eficiencia de segunda ley del 22% en este equipo, y determina la huella hídrica y de carbono

(consumo de agua y generación de dióxido de carbono) y su impacto al medio ambiente.

A nivel internacional el análisis exergético se aplica de igual manera y se suele combinar con y aprovechar para comparar sistemas de cogeneración, Feidt y Costea [5] realizan una comparación de sistemas combinados de calor y potencia (cogeneración) en turbinas de vapor, turbinas de gas, motores de combustión interna y motores de combustión externa. Los autores proponen valores numéricos de restricción a los sistemas para lograr valores más altos de eficiencia de segunda ley. Un ejemplo de un análisis energético y exergético de una planta térmica en operación se puede ver en el trabajo de Osueke, Onokwai y Adeoye [6] quienes logran identificar el comportamiento de la planta para diferentes temperaturas para diferentes temperaturas del ambiente (estado muerto). De forma similar a múltiples análisis de sistemas similares, la máxima cantidad de irreversibilidades (exergía destruida) se da en la caldera.

En la actualidad no se cuenta con un estudio detallado de la capacidad de la planta térmica de la universidad Santo Tomas, así como de sus rangos de operación, de tal forma que el docente puede variar parámetros de entrada y conocer los valores de parámetros de salida esperados. En este trabajo se tomaron datos experimentales del funcionamiento de la planta a tres velocidades diferentes de giro de la turbina y seguido de esto se realizó el análisis por primera y segunda ley de la termodinámica. También se generó una guía de laboratorio para prácticas en la Planta Térmica de la universidad con el fin de orientar a los estudiantes en sus experimentaciones. (Documento anexo).

9 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Para la apropiación de los conceptos que se imparten en clase, es adecuado contar con experiencias vivenciales que permitan a los estudiantes la puesta en práctica de la teoría. Con el fin de garantizar esto, las instituciones educativas invierten grandes recursos en equipos con los cuales se apoyan para cumplir dicho objetivo. La Universidad Santo Tomás y específicamente la facultad de Ingeniería Mecánica cuenta con una planta térmica ubicada en los laboratorios de la sede central; esta planta permite a los estudiantes realizar prácticas en los espacios académicos de Termodinámica, Ciclos Termodinámicos, Plantas Térmicas y Sistemas de Transformación de Energía, donde se afianzan los conocimientos de propiedades de sustancia pura, primera ley, funcionamiento de equipos típicos de ingeniería de flujo estacionario, segunda ley y generación de potencia eléctrica a partir de calor. Una característica en común de estos equipos que prestan servicios académicos es que no se encuentran en un estado óptimo operativo o en general con el pasar del tiempo se deja de tener un reconocimiento del estado real de los mismos.

La planta térmica en estudio al día de hoy se encuentra en funcionamiento, sin embargo, se hace evidente que durante el pasar del tiempo no se ha implementado ningún tipo de idea en pro del estudio del funcionamiento de la misma. Esto tiene como consecuencia que al día de hoy no se cuente con una caracterización al respecto que conste de información como potencia, curvas de caracterización, eficiencia en diferentes regímenes de trabajo y en general datos que permitan conocer el estado real de la planta.

Para la evaluación de las prácticas y la revisión de los conceptos apropiados, los docentes de los espacios académicos nombrados requieren las curvas de caracterización y en general de información, que muestre el comportamiento de la planta. Por lo anterior se plantea surge la pregunta de ¿Como caracterizar el funcionamiento de los equipos de la planta para conocer su funcionamiento real? Partiendo de esto, se plantea realizar el análisis termodinámico de la planta a partir de la primera y segunda ley de la termodinámica. Este procedimiento se denomina comúnmente en investigación como análisis exergético (propiedad que permite

determinar el potencial de trabajo útil de una cantidad dada de energía en algún estado especificado.

10 OBJETIVOS

10.1 Objetivo general:

- Caracterizar el funcionamiento de la Planta Térmica de la Universidad Santo Tomás por medio de un análisis exergético.

10.2 Objetivos específicos

- Obtener valores experimentales del funcionamiento de la Planta Térmica de la Universidad Santo Tomás en diferentes regímenes de trabajo.
- Realizar el análisis exergético de la Planta térmica.
- Generar una guía de soporte para prácticas de laboratorio la cual incluya: gráficas de potencia y eficiencia en diferentes regímenes de trabajo de la planta.

11 MARCO TEÓRICO

11.1 ORIGEN DEL CONCEPTO EXERGÍA

Hoy en día a nivel mundial el concepto referente a los recursos energéticos viene tomando mayor importancia, haciendo que muchas entidades generen un análisis y replanteamiento en el cómo se está gastando la energía y que tan eficientes se están dando dichos procesos. Desde este punto han nacido intereses científicos que buscan como principal logro el poder obtener sistemas en los que se puedan utilizar en una tasa de eficiencia mas alta los recursos disponibles. Teniendo en cuenta que la primera ley de la termodinámica hace referencia a la cantidad de energía y basa su planteamiento en que dicha energía no puede crearse ni destruirse. El planteamiento anteriormente nombrado hace que la primera ley de la termodinámica no brinde un gran avance con relación a la optimización y mejor utilización de la energía debido a que básicamente solo brinda la oportunidad de contabilizar cuanta energía se encuentra en cada proceso.

Partiendo del aporte limitado que brinda la primera ley en cuestión del estudio y análisis del gasto energético, surge la segunda ley que tiene que ver con la calidad de la energía más específicamente, se ocupa de la degradación de la energía durante un proceso, de la generación de entropía y de la perdida de oportunidades para efectuar trabajo, además de ofrecer el margen suficiente para la mejora [2]

El concepto de exergía nace aproximadamente en Francia en 1893 y de allí en adelante diferentes autores han expuesto sus teorías con respecto a este concepto. Teniendo claro que, con base en la primera ley de la termodinámica, la energía no se crea ni se destruye y que con la fundamentación de la segunda ley la cual dice que la energía no puede ser utilizada en su totalidad mientras interactúe con el entorno. Surge el concepto de exergía el cual hace referencia a una propiedad de los sistemas termodinámicos que permite la cuantificación del trabajo que se puede aprovechar en determinado sistema.

11.1.1 ANÁLISIS HISTORICO DEL CONCEPTO DE EXERGÍA

Distintos autores a lo largo del tiempo han realizado investigaciones con relación a la exergía y su aplicación. Liu y Wepfer [7], realizaron una investigación en la que presentan alrededor de 600 referencias relacionadas a dicho concepto. De tal manera que durante el transcurso del tiempo este concepto ha venido incrementando su importancia hasta el día de hoy que se evidencian libros, trabajos de grado, congresos y enfoques académicos para aumentar el interés sobre este concepto.

Autores como (Maxwell (1871), Gibbs (1873), Kelvin (1889), Gouy (1889) y Stodola (1898)), caracterizados por sus grandes contribuciones, han generado grandes debates en la conceptualización de dicha propiedad termodinámica, pero fueron Goy y Stoddola a finales del pasado siglo quienes formularon mencionada ley [8].

Aproximadamente en el año 1950 después de la segunda guerra mundial en Europa se vio un amplio interés en recuperar su industria de igual manera que en Estados Unidos, según Wpfer [7], dicha necesidad por recuperar la industria después de la guerra hizo que personajes como Rant (1953) utilizaran el termino de exergía que en su mayoría fue asumido por los autores europeos.

Autores como Kotas [9], realizaron una amplia aplicación de la exergía por medio de conceptos como lo son las auditorias exergéticas fundamentadas en la estimación de costos, optimización termo económica, síntesis de procesos entre otros; esto implementando, diagramas, procesos, criterios de eficiencia, tablas entre otras ayudas.

Con el estudio de diferentes metodologías y la implementación del análisis económico combinándose con técnicas de optimización Tsatsaronis [10], hace una revisión sistemática en la cual busca combinar los puntos anteriormente nombrados por medio de un análisis exergético llevado hasta el análisis económico y de optimización de equipos.

12 MARCO CONCEPTUAL

Para el desarrollo del presente trabajo se tienen en cuenta diferentes conceptos partiendo desde la exergía en su definición exacta y todos sus fundamentos teóricos.

12.1 EXERGÍA

La definición de exergía se puede encontrar bajo el concepto de diferentes autores; básicamente todos concluyen en que es una propiedad termodinámica de un sistema la cual permite la cuantificación del trabajo aprovechable del mismo.

Para T.J Kotas [9], la exergía es definida como el máximo trabajo útil que puede ser obtenido, teniendo el medio ambiente como estado de referencia.

No obstante, este concepto trae relacionado consigo mismo otro tipo de características que subyacen como, por ejemplo, la teoría termo económica la cual plantea la relación entre la optimización térmica en pro de la economía de los sistemas. Dando parte a las diferentes teorías de ahorro energético y de máxima eficiencia con respecto a la utilización óptima de la cantidad de trabajo que proporcionan los sistemas termodinámicos.

Para Valero y Amaya [11], el concepto de exergía hace referencia principalmente a un sistema de medición objetivo para las manifestaciones físicas de la energía, puesto que este tipo de ayuda brinda resultados que aportan a la optimización económica y respaldan su concepto con la teoría de que cualquier tipo de proceso natural o artificial se puede estudiar desde el concepto de exergía debido a que esta es unidimensional.

12.1.1 EFICIENCIA EXERGÉTICA

Con referencia a la exergía también se puede obtener un porcentaje de eficiencia de los sistemas en estudio, este porcentaje hace referencia a la división entre la exergía utilizada y la exergía consumida.

12.1.2 EXERGIA DESTRUIDA

Hace referencia al porcentaje de exergía que resulta ser desperdiciada o destruida por diferentes causas como lo pueden ser pérdidas en equipos o procesos que se involucran en el sistema.

12.2 PRINCIPIOS TERMODINÁMICOS

Para poderse aplicar el concepto de exergía es necesario tener los análisis de primera y segunda ley de manera clara, es por esto que a continuación se definirán cada uno de los conceptos mencionados:

12.2.1 ESTADO MUERTO

Se afirma que un sistema está en el estado muerto cuando se encuentra en equilibrio termodinámico con el ambiente. En este estado, un sistema está a la temperatura y a la presión de su ambiente (en equilibrio térmico y mecánico), no tiene energía cinética o potencial relativa a su ambiente (velocidad cero y elevación cero por arriba del nivel de referencia) y no reacciona con el ambiente (químicamente inerte). Tampoco hay efectos de desequilibrio magnético, eléctrico y tensión superficial entre el sistema y sus alrededores, si éstos son relevantes para la situación específica. Las propiedades de un sistema en el estado muerto se denotan mediante el subíndice cero, por ejemplo, P_o , T_o , h_o , U_o y S_o . A menos que se especifique de otra manera, la temperatura y la presión del estado muerto se suponen como $T_o = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($77\text{ }^{\circ}\text{F}$) y $P_o = 1\text{ atm}$ (101.325 kPa o 14.7 psia). Un sistema tiene exergía cero en el estado muerto. [2]

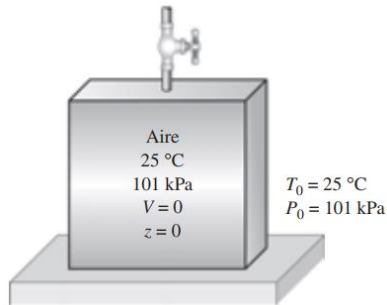


Figura 2 Sistema en equilibrio con los alrededores

Fuente: Yanus A Cegiel [2]

12.2.2 PRIMERA LEY DE LA TERMODINÁMICA

La *primera ley de la termodinámica*, conocida también como *el principio de conservación de la energía*, brinda una base sólida para estudiar las relaciones entre las diversas formas de interacción de energía. A partir de observaciones experimentales, la primera ley de la termodinámica establece que *la energía no se puede crear ni destruir durante un proceso; sólo puede cambiar de forma*. Por lo tanto, cada cantidad de energía por pequeña que sea debe justificarse durante un proceso. [2]

12.2.3 SEGUNDA LEY DE LA TERMODINÁMICA

La segunda ley de la termodinámica afirma que la energía tiene calidad, y de igual manera cantidad. El conservar la calidad de la energía es un interés principal de la ingeniería, y la segunda ley brinda los medios necesarios para determinar la calidad, así como el nivel de degradación de la energía durante los diferentes procesos.

12.2.4 BALANCE DE ENERGÍA

Es el cambio neto (aumento o disminución) de la energía total del sistema durante un proceso; es igual a la diferencia entre la energía total que entra y la energía total que sale del sistema durante el proceso. Es decir, [2]

$$\left(\begin{array}{c} \text{Energía total que} \\ \text{entra al sistema} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Energía total que} \\ \text{sale del sistema} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Cambio en la energía} \\ \text{total del sistema} \end{array} \right)$$

o

$$E_{\text{entrada}} - E_{\text{salida}} = \Delta E_{\text{sistema}}$$

Figura 3 Definición balance de energía

Fuente: Yanus A Cegel [2]

Esta relación es más conocida como **balance de energía** y es aplicable a cualquier tipo de sistema que experimenta cualquier clase de proceso. El uso exitoso de esta relación para resolver problemas de ingeniería depende de la comprensión de las distintas formas de energía y de reconocer los modos como ésta se transfiere. [2]

12.2.5 VOLUMEN DE CONTROL

Para aplicar el análisis exergético de manera correcta, resulta conveniente dividir el sistema por medio de volúmenes de control que delimitan el sistema a estudiar, permitiendo generar fronteras reales o imaginarias que permiten abstraer determinadas partes del sistema.

12.2.6 IRREVERSIBILIDADES

Cuando se habla de exergía se debe tener en cuenta que la primera causa de destrucción de exergía se debe a las irreversibilidades de los sistemas; esto hace

referencia a que cuando esto sucede no hay forma de que los sistemas junto con sus alrededores puedan ser restaurados en relación a sus estados iniciales.

12.2.7 BALANCE EXERGÉTICO

Con énfasis en la información que se obtiene del balance de primera ley y siguiendo los principios de la segunda ley, surge el concepto de balance exergético que no hace mas si no referencia a la diferencia entre las exergías de entrada y de salida del volumen de control que se encuentra en estudio.

12.2.8 DIAGRAMAS PARA REPRESENTACION DE FLUJO EXERGÉTICO

Con el objetivo de generar una compresión más clara y optima del comportamiento de los equipos analizados de manera exergética, surgen los diferentes diagramas de representación de flujo. Entre los diagramas mas utilizados se encuentra el diagrama de Sankey. Dicho diagrama será el utilizado en esta investigación con el fin de dar a conocer de manera gráfica la distribución exergética de la planta térmica.

13 ESTADO DEL ARTE

Con regularidad los sistemas de producción de energía eléctrica por medio de equipos térmicos son estudiados y analizados con base en la primera ley de la termodinámica, esto hace que principalmente queden de lado diferentes aspectos importantes a tener en cuenta como lo son las pérdidas, la calidad con la que se consume la energía y el cómo estos equipos se ven afectados por las irreversibilidades presentes, fundamentalmente, no se tiene en cuenta el análisis por segunda ley y la profundización que brindan los análisis exergéticos en el diagnóstico y estudio de dichos sistemas.

A continuación, se presentan algunos proyectos relevantes realizados con base en la fundamentación teórica del análisis exergético en Colombia y a nivel internacional, dichos proyectos son citados con el fin de tener un apoyo comparativo y en general para dar a conocer los resultados obtenidos por diferentes autores que se han enfocado en esta temática.

13.1 ANÁLISIS ENERGÉTICO, EXERGÉTICO Y ECONÓMICO DE UNA PLANTA GEOTERMICA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN ESPAÑA

El autor en este trabajo de investigación resalta como en los últimos tiempos se ha disparado el consumo de energía a nivel mundial y como al día de hoy no se cuentan con medidas que permitan dar soluciones alternativas al alto consumo. [12] . Se realiza un barrido al como los combustibles fósiles no son suficientes para solventar la demanda con base en temas de altos costos y los problemas ambientales que estos generan. Una vez se expone la problemática en autor se enfoca en las investigaciones que surgen actualmente en pro de la optimización de los procesos ya existentes de generación de energía eléctrica, específicamente procesos geotérmicos.

Este trabajo analiza desde un punto de vista termodinámico y económico una planta de producción de energía eléctrica a partir de energía geotérmica; se realiza la descripción binaria de la planta seleccionada y se procede con el planteamiento de los correspondientes diagramas y cálculos.

La planta en cuestión funciona bajo el principio de ciclo Rankine en la que la temperatura del fluido en el reservorio se debe encontrar entre 150 °C y 190 °C. Este se extrae por una tubería con ayuda de una bomba que lo hace fluir a través de un intercambiador de calor en el que se transmite su energía térmica a otro fluido secundario. De allí se extrae vapor y se expande en una turbina encargada de generar la energía eléctrica; una vez el fluido cumple su función en la turbina, se dirige al condensador gracias a la corriente de agua que circula por su interior. A la salida se encuentra de nuevo con la bomba de tal manera que se convierte en un ciclo cerrado. [12]

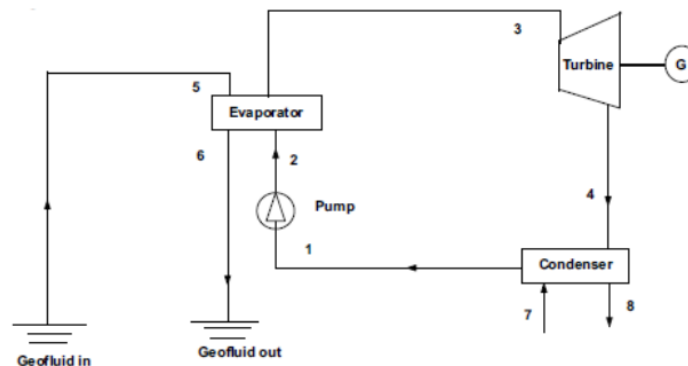


Figura 4 Esquema del ciclo termodinámico diseñado

Fuente: Análisis energético, exergético y económico de una planta geotérmica de generación de energía eléctrica en España [12]

Las ecuaciones que gobiernan este ciclo son el primer y segundo principio de la termodinámica. Estas se van a particularizar para los 4 sistemas que forman el ciclo, que son turbina, bomba, evaporador y condensador. A partir de estos componentes se va a llevar a cabo un análisis energético y exergético del ciclo. Se comienza con el análisis energético el cual tiene como objetivo caracterizar todos los puntos del

sistema con su presión, temperatura y caudal. Además, se calcula el rendimiento energético de la planta completa. [12]

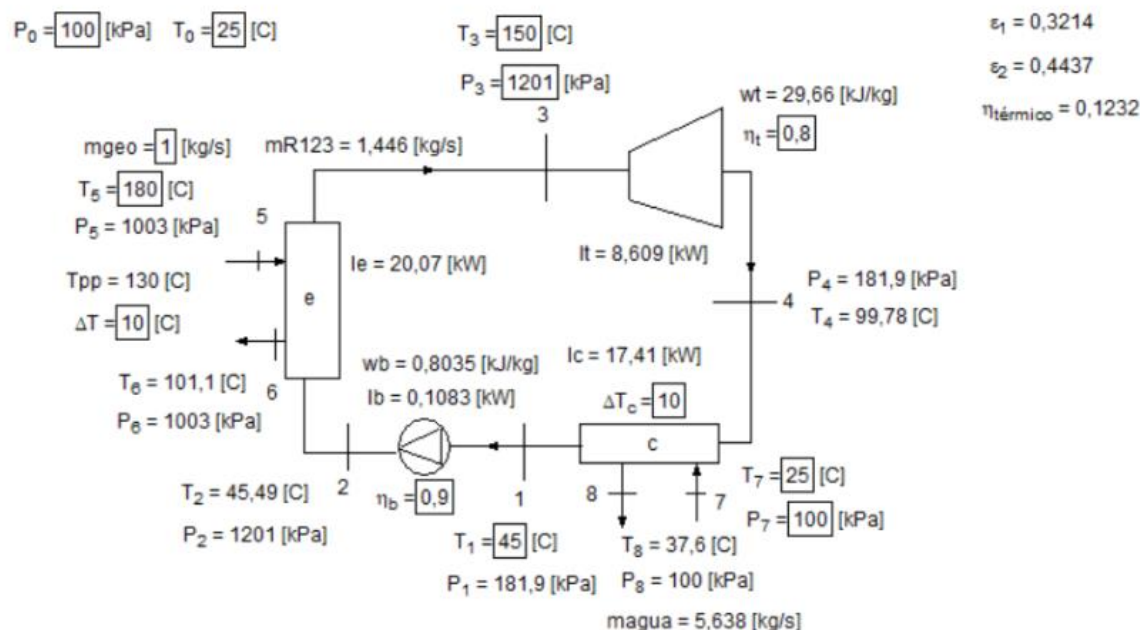


Figura 5. Esquema del ciclo modelado y resultados obtenidos.

Fuente: Análisis energético, exergético y económico de una planta geotérmica de generación de energía eléctrica en España [12]

En la figura superior se evidencian los resultados de caracterización del sistema como lo son temperaturas, presiones, potencias exergéticas destruidas de cada sistema y los rendimientos tanto energéticos como exergéticos del ciclo completo. Además, resulta interesante estudiar la destrucción exergética porcentual del ciclo.

Tabla 1 Destrucciones exergéticas porcentuales de la planta

	Y (%)
Turbina	6,633
Bomba	0,083
Condensador	13,41
Evaporador	15,46

Fuente: Análisis energético, exergético y económico de una planta geotérmica de generación de energía eléctrica en España [12]

Con base en el desarrollo de la investigación del autor se evidencia que donde más exergía destruida se evidencia es en el evaporador y el condensador. Con base en el texto se resaltan pérdidas que surgen en el condensador y en el sistema de inyección del fluido, esto se debe al deterioro normal de los equipos durante el tiempo de operación de la planta.

13.2 ANÁLISIS EXERGÉTICO Y TERMOECOLÓGICO DE UNA CALDERA ACUOTUBULAR DE BAGAZO Y DE CARBÓN EN UN INGENIO AZUCARERO DEL VALLE DEL CAUCA

Con esta investigación el autor hace referencia en lo importante que es alcanzar máximos valores de eficiencia en cuanto a costos y beneficios en la industria azucarera a nivel de equipos, operaciones y control de parámetros de funcionamiento como lo pueden ser calidad y cantidad de combustible suministrado, la tecnología empleada entre otros.

Por lo tanto, esta investigación está enfocada en un análisis exergético realizado a una caldera de bagazo y carbón en la que se identificó las zonas mas críticas que generar una gran cantidad de exergía destruida. [13]

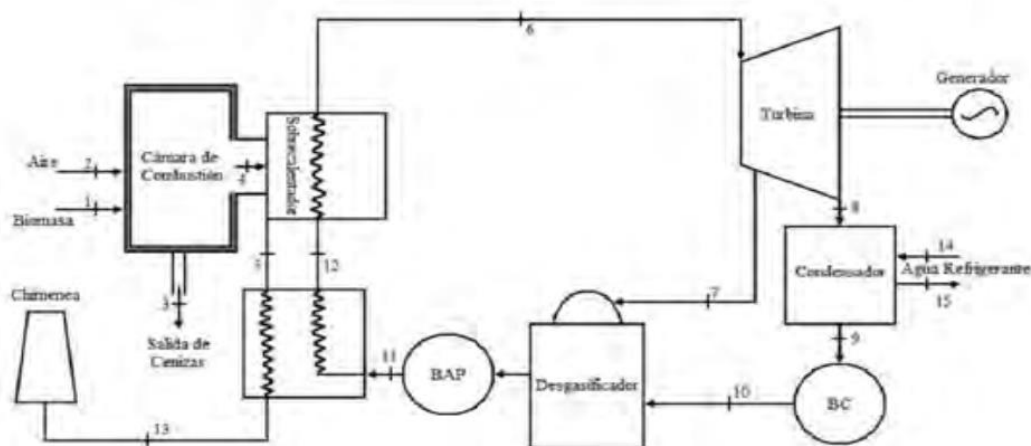


Figura 6 Esquema del principio de la planta de estudio

Fuente: Análisis exergético y termo ecológico de una caldera acuotubular de bagazo y de carbón en un ingenio azucarero del valle del cauca [13]

El análisis exergético se le aplicó a la caldera cuestión (Figura 4) con el fin de determinar las pérdidas de la exergía y la eficiencia exergética del sistema o volumen de control.

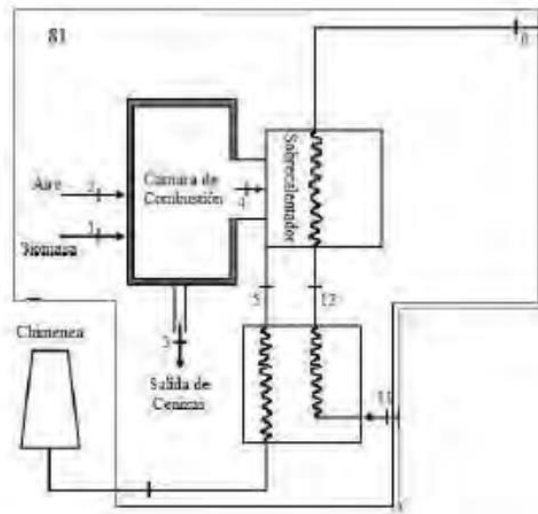


Figura 7 Esquema del subsistema general de la caldera

Fuente: Análisis exergético y termo ecológico de una caldera acuotubular de bagazo y de carbón en un ingenio azucarero del valle del cauca [13]

Con base en los procedimientos matemáticos aplicados en este análisis fundamentado en la primera y segunda ley de la termodinámica se obtuvieron los siguientes resultados:

Balances exergéticos	
Exergía del combustible	32094,4186 kWh/h
Temperatura adiabática de llama	1082,17703 °C
Exergía de los gases	18860,3253 kWh/h
Rendimiento exergético combustion	58,7651254 %
Exergía del vapor	12154,388 kWh/h
Rendimiento exergético global de la caldera	37,8707219 %

Figura 8 Resultados del análisis exergético

Fuente: Análisis exergético y termo ecológico de una caldera acuotubular de bagazo y de carbón en un ingenio azucarero del valle del cauca [13]

En los resultados obtenidos de esta investigación no se evidencia la exergía destruida en porcentaje, pero se puede evidenciar claramente que el rendimiento exergético de la combustión esta por encima de un 50% y en general el rendimiento global de la caldera se encuentra sobre un 37.8%.

13.3 APLICACIÓN DEL ANÁLISIS EXERGÉTICO A UNA INSTALACIÓN DE PRODUCCIÓN DE HIDROCARBUROS DE ECOPETROL S.A.

El autor de este trabajo enfocó su investigación en la aplicación de un análisis exergético a una de las instalaciones de producción de hidrocarburos pertenecientes a Ecopetrol con el propósito de encontrar las mayores pérdidas exergéticas y proponer un esquema óptimo operacional que minimice las mismas.
[14]

El análisis exergético se efectuó con base en el concepto general de exergía, que se define como el máximo trabajo que teóricamente puede ser obtenido de una cantidad de energía en un equipo de operación. Los resultados muestran las eficiencias exergéticas en las etapas de compresión para los diferentes casos planteados, definidas como la relación de exergía útil y la exergía total empleada.
[14]

El concepto de exergía se aplico con referencia en 4 diferentes casos de producción de los cuales después de aplicar los cálculos y procedimientos correspondientes se obtuvieron los siguientes resultados.

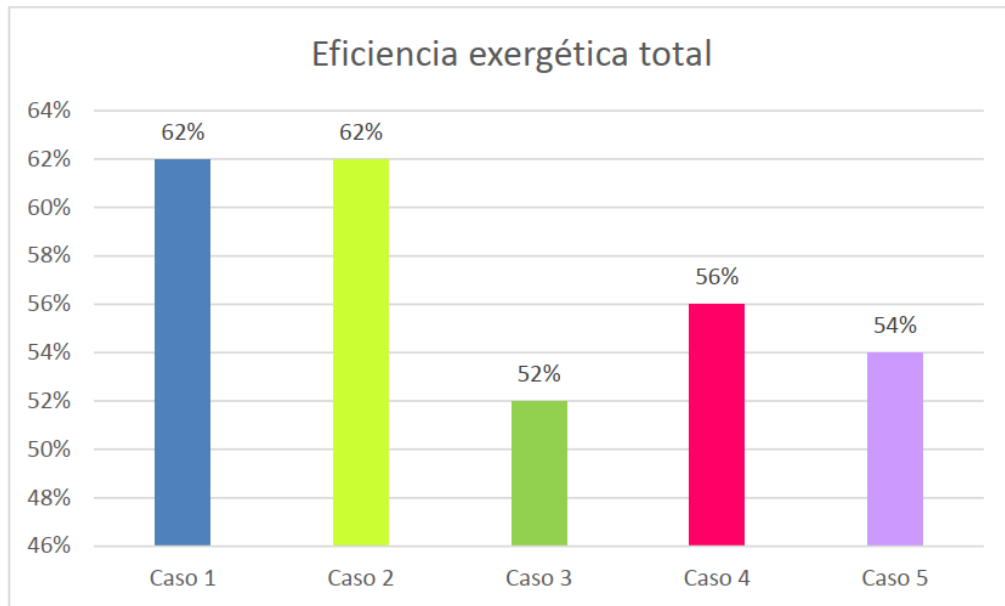


Figura 9 Eficiencia exergética total

Fuente: Aplicación del análisis exergético a una instalación de producción de hidrocarburos de Ecopetrol s.a. [14]

En este trabajo de investigación en el que se aplica la exergía a un sistema de producción de hidrocarburos en específico y no a una planta de generación de energía eléctrica, con base en los resultados se pueden observar una variación notable entre el caso uno con un 62% de eficiencia exergética y el caso 5 con un 54% de eficiencia exergética,

14 METODOLOGIA

14.1 GENERALIDADES

La planta térmica de la universidad Santo Tomas está diseñada para desarrollar labores académicas con el fin de brindar a los estudiantes y profesores un mayor apoyo y acercamiento real de una planta de generación de energía eléctrica industrial.



Figura 10 Vista isométrica de la planta

Fuente: Ingenium (ingeniería y consultoría LTDA) [15]

El sistema opera bajo el principio de funcionamiento de un ciclo Rankine con sobrecalentamiento. La figura 1 evidencia la representación digital de la planta. Seguido de esto la figura 2 presenta un diagrama de equipos de la planta el cual proporcionara la explicación del funcionamiento de la misma.

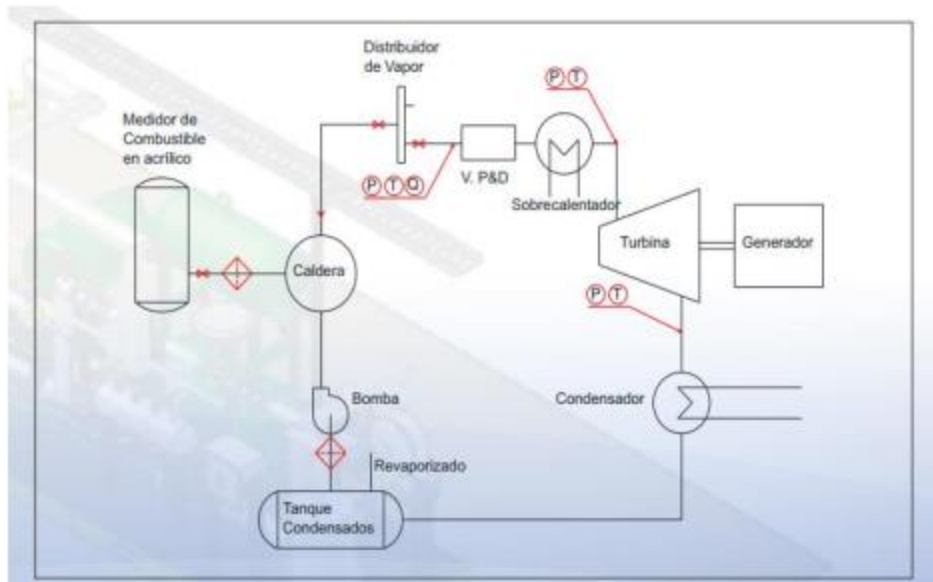


Figura 11 Diagrama de equipos de la planta térmica

Fuente: Ingenium (ingeniería y consultoría LTDA) [15]

El agua pasa a fase de vapor en una caldera pirotubular de 6 BHP, la cual quema combustible Diesel. Siguiendo el principio del ciclo Rankine, el vapor sale como vapor saturado a 750 kPa, pasa por una serie de válvulas de corte y un distribuidor de vapor (manifold). Del distribuidor se lleva el vapor a una válvula de control proporcional (V. P&D en el diagrama) con la cual se controla la cantidad de flujo másico en el sistema. A continuación, el vapor encuentra un medidor de flujo de platina de orificio (No se muestra en el diagrama de equipos). Para aumentar la temperatura del vapor y tratar de llevarlo a sobrecalentamiento, este se hace pasar por un sobrecalentador de resistencias eléctricas. Luego el vapor pasa por una turbina tipo Curtis y el condensador, el cual extrae el calor del ciclo con agua de refrigeración la cual recircula por una torre de enfriamiento. El agua que se condensa se retiene en el tanque de condensados el cual trabaja a presión de vacío. Del tanque de condensados la bomba transfiere el agua a la caldera cuando el nivel de esta llega al límite inferior, en el cual se enciende la bomba.

La regulación del funcionamiento de la planta se da por medio de un PLC el cual controla el flujo másico abriendo o cerrando la válvula de control proporcional, para lograr la velocidad de giro de la turbina solicitada en el panel de control. La planta

también cuenta con una serie de medidores de presión y temperatura (Figura 2), junto con el medidor de caudal ya mencionado.

La presencia de las válvulas de corte, el distribuidor de vapor, la válvula de control proporcional, la platina de orificio y el sobrecalentador hace que el vapor pierda presión significativamente entre la salida de la caldera y la entrada de la turbina. Dado la cantidad baja de puntos de toma de propiedades con los que cuenta la planta (presión y temperatura) se establecen seis estados en el diagrama de equipos que se presenta en la Figura 11.

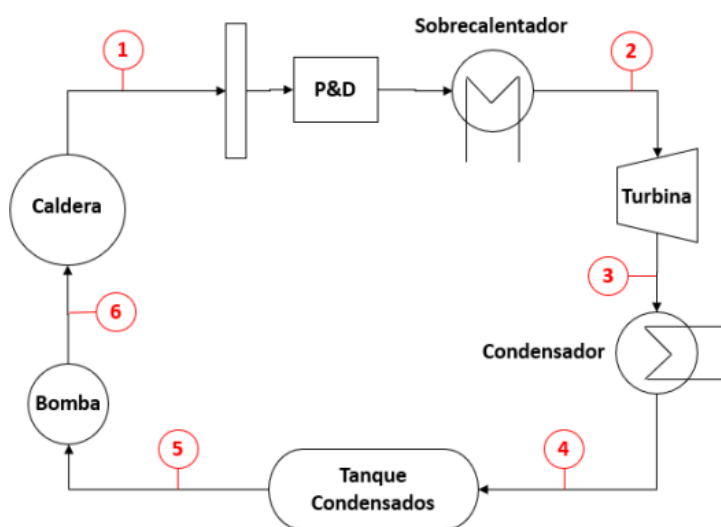


Figura 12 Diagrama de equipos de la planta térmica

Fuente: Elaboración propia

14.2 REGÍMENES DE TRABAJO

Para el presente estudio se tomaron las propiedades en tres regímenes de trabajo del sistema dependiendo de la velocidad de giro solicitada a la turbina, todos en operación estable en estado estacionario: 5000 RPM, 4000 RPM y 3000 RPM. Los valores de las propiedades termodinámicas de los seis estados de estos tres regímenes se presentan en las Tablas 1, 2 y 3 respectivamente.

A partir de estas propiedades se puede aproximar el diagrama temperatura-entropía del funcionamiento del ciclo termodinámico bajo el que opera la planta (Ver Figura 4)

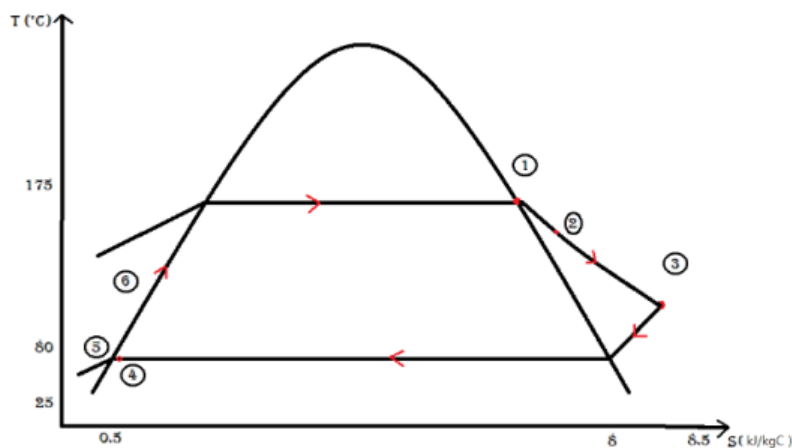


Figura 13 Diagrama temperatura – entropía del ciclo

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2. Propiedades termodinámicas de los estados para 5000 RPM de velocidad de giro de la turbina

Estado	Presión (kPa)	Temperatura (°C)	Fase	Entalpía (kJ/kg)	Entropía (kJ/kg·K)	Exergía de flujo (kJ/kg)
1	750.00	167.90	x=1	2765.88	6.70	771.96
2	310.00	141.50	Sobrecalentado	2740.92	7.02	653.49
3	20.00	80.00	Sobrecalentado	2647.06	8.02	260.71
4	20.00	60.00	x=0	251.97	0.83	7.97
5	20.00	60.00	x=0	251.97	0.83	7.97
6	750.00	60.10	Líquido	252.80	0.83	8.72

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3 Propiedades termodinámicas de los estados para 4000 RPM de velocidad de giro de la turbina

Estado	Presión (kPa)	Temperatura (°C)	Fase	Entalpía (kJ/kg)	Entropía (kJ/kg*K)	Exergía de flujo (kJ/kg)
1	750.00	167.90	x=1	2765.88	6.70	771.96
2	160.00	143.10	Sobrecalentado	2756.99	7.35	568.96
3	10.00	80.00	Sobrecalentado	2648.60	8.34	165.84
4	10.00	60.00	x=0	191.86	0.65	2.83
5	10.00	60.00	x=0	191.86	0.65	2.83
6	750.00	45.80	Líquido	192.61	0.65	3.58

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4 Propiedades termodinámicas de los estados para 3000 RPM de velocidad de giro de la turbina

Estado	Presión (kPa)	Temperatura (°C)	Fase	Entalpía (kJ/kg)	Entropía (kJ/kg*K)	Exergía de flujo (kJ/kg)
1	750.00	167.90	x=1	2765.88	6.70	771.96
2	160.00	143.10	Sobrecalentado	2756.99	7.35	568.96
3	10.00	80.00	Sobrecalentado	2648.60	8.34	165.84
4	10.00	60.00	x=0	191.86	0.65	2.83
5	10.00	60.00	x=0	191.86	0.65	2.83
6	750.00	45.80	Líquido	192.61	0.65	3.58

Fuente: Elaboración propia

14.3 ANÁLISIS DE ENERGÍA

A partir de los balances de primera ley de la termodinámica para la caldera y la turbina, se establece el calor de entrada, la potencia de salida y la eficiencia térmica.

Ecuación 1 Calor de entrada

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m} * (h_1 - h_6) \quad (1)$$

Para calcular la potencia de salida se tiene que multiplicar el flujo masico por la diferencia de entalpías en la turbina

Ecuación 2 Potencia de salida

$$\dot{W}_{out} = \dot{m} * (h_2 - h_3) \quad (2)$$

Para el cálculo de eficiencia térmica se emplea el siguiente procedimiento:

Ecuación 3 Eficiencia térmica

$$\eta = \frac{\dot{W}_{out}}{\dot{Q}_{in}} \quad (3)$$

También se puede calcular la eficiencia isoentrópica con la que está trabajando la turbina, según la ecuación:

Ecuación 4 Eficiencia isoentrópica

$$\eta_t = \frac{\dot{W}_{out}}{\dot{W}_{out,rev}} \quad (4)$$

Los valores obtenidos para cada uno de los regímenes de trabajo se pueden observar en la Tabla 4

Tabla 5 Resultado de análisis de energía del ciclo

Régimen	$\dot{Q}_{in}$ (kW)	$\dot{W}_{out}$ (kW)	η (%)	η_t (%)
5000 RPM	72.88	2.72	3.73	21.9
4000 RPM	74.62	3.14	4.21	25.4
3000 RPM	74.62	3.14	4.21	25.4

Fuente: Elaboración propia

14.4 Análisis Exergético

Para realizar el análisis exergético se tomó el estado muerto estándar ($T_0 = 25^\circ\text{C}$ y $P_0 = \text{atm}$)

14.4.1 Exergía de flujos

A partir del estado muerto se calcularon las exergías de flujo (Ver tablas 1,2 y 3), de la siguiente manera:

Ecuación 5 Exergía de flujo

$$\psi_n = (h_n - h_0) - T_0(s_n - s_0) \quad (5)$$

Donde el subíndice n representa el estado y se han despreciado las variaciones de las energías cinética y potencial.

14.4.2 Exergías destruidas

La tasa de cambio de la exergía dentro del volumen de control durante un proceso es igual a la tasa neta de transferencia de exergía a través de la frontera del volumen de control por calor, trabajo y flujo másico menos la tasa de destrucción de exergía dentro de la frontera del volumen de control [2]. Para un sistema de flujo estacionario con corriente única se puede explicar de la siguiente manera:

Ecuación 6 Tasa de cambio de la exergía

$$\sum \left(1 - \frac{T_0}{T_k} \right) * \dot{Q}_k - \dot{W} + \dot{m} * (\psi_{in} - \psi_{out}) - \dot{X}_d = 0 \quad (6)$$

Donde $\dot{Q}_k$ es el calor que entra o sale, $\dot{W}$ es la potencia que entra o sale y $\dot{X}_d$ es la exergía destruida en el volumen de control. A partir de la ecuación (6) se pueden calcular las exergías destruidas en cada uno de los equipos de la planta.

La caldera no produce ni consume ningún trabajo, se tomará el calor de entrada calculando el balance de energía de este equipo, y una temperatura de transferencia de calor en la frontera de 1000°C, por lo tanto:

Ecuación 7 Exergía destruida en la caldera

$$\dot{X}_{d,caldera} = \left(1 - \frac{T_0}{T_k} \right) * \dot{Q}_k + \dot{m} * (\psi_6 - \psi_1) \quad (7)$$

Del estado 1 al estado 2 se sabe que hay pérdidas de presión y de calor, así como entrada de trabajo eléctrico en las resistencias eléctricas del sobrecalentador, sin embargo, no se pueden establecer los valores de estos calores de entrada y de salida por falta de datos. Por lo tanto, estos se despreciarán y el cálculo de exergía destruida entre el estado 1 y el estado 2 serían:

Ecuación 8 Exergía destruida – Estados 1 - 2

$$\dot{X}_{d,1-2} = \dot{m} * (\psi_1 - \psi_2) \quad (8)$$

La turbina se considera adiabática, por lo cual el cálculo de exergía destruida se da de la siguiente forma:

Ecuación 9 Exergía destruida en la turbina

$$\dot{X}_{d,destruida} = -\dot{W} + \dot{m} * (\psi_2 - \psi_3) \quad (9)$$

Ecuación 10 Eficiencia de segunda ley de la turbina

$$\eta_{tt} = \frac{\dot{W}_{out}}{\dot{W}_{out,rev}} = \frac{\dot{W}_{out}}{\dot{W}_{out} + \dot{X}_{d,turbina}} \quad (10)$$

El condensador no produce ni consume ningún trabajo, se tomará el calor de salida calculando en el balance de energía de este equipo, y una temperatura de transferencia de calor en la frontera de 20°C, por lo tanto:

Ecuación 11 Exergía destruida en el condensador

$$\dot{X}_{d,condensador} = \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) * \dot{Q}_k + \dot{m} * (\psi_3 - \psi_4) \quad (11)$$

La bomba se considera adiabática, por lo tanto, el cálculo de la exergía destruida sería:

Ecuación 12 Exergía destruida en la bomba

$$\dot{X}_{d,bomba} = -\dot{W} + \dot{m} * (\psi_2 - \psi_3) \quad (12)$$

14.5 Análisis Exergético del proceso de Combustión en la Caldera

Para realizar el análisis exergético en profundidad del proceso de combustión, se debe contar con los datos de entrada y salida de los sistemas internos de la caldera. Sin embargo, si no se cuentan con la información se consideran únicamente las entradas y salidas de la caldera despreciando los componentes internos (Ver Figura 14).

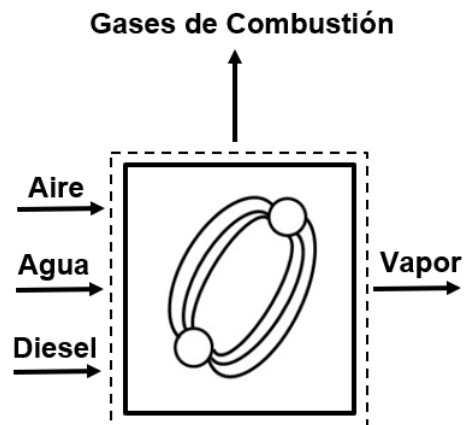


Figura 14 Representación Volumen de control Caldera

Fuente: Elaboración Propia

Considerado anteriormente como fuente de energía el combustible Diesel, en la Tabla 6 se presentan los valores de las fracciones másicas del Diesel fósil [26].

Tabla 6 Composición química del diésel fósil

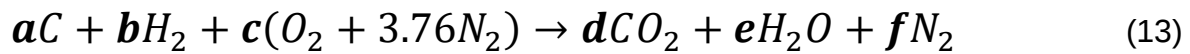
Composición	Diésel Fósil
Carbono %	86.4
Hidrógeno %	13.6
Oxígeno %	0
Azufre %	0

Fuente: Desarrollo e Innovación en Ingeniería [26].

14.5.1 Balance Molar de la composición del Diesel

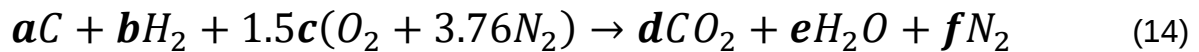
A partir de la composición del Diesel se establece el balance molar de la combustión para determinar la cantidad teórica del aire mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 13 Balance Molar de la Combustión con cantidad teórica de aire



Considerando el trabajo de la Caldera con un 50% de exceso de aire, se realiza el balance molar de la combustión con este valor asumiendo el proceso de combustión completa:

Ecuación 14 Balance Molar de la Combustión con exceso de 50% de aire



Obteniendo los coeficientes estequiométricos se puede establecer el flujo másico del aire mediante la relación aire-combustible y el flujo másico del combustible.

Ecuación 15 Relación Aire / Combustible

$$AC = \frac{m_{aire}}{m_{comb}} \quad (15)$$

Ecuación 16 Flujo másico del aire

$$\dot{m}_{aire} = (AC)(\dot{m}_{combustible}) \quad (16)$$

14.5.2 Exergía de la combustión

Considerando la representación del volumen de control de la caldera (Fig. 14) se realiza el balance exergético asumiendo un estado muerto estándar mencionado anteriormente. La exergía del combustible se puede estimar utilizando las ecuaciones formuladas por Szargut y Styrylska [27].

Ecuación 17 Relación adimensional AC con LHV

$$\beta_1 = 1.0438 + 0.1882 \frac{H}{C} + 0.0610 \frac{O}{C} + 0.0404 \frac{N}{C} \quad (17)$$

Ecuación 18 Exergía del combustible

$$\dot{X}_c = \beta_1 LHV + 6.740S \quad (18)$$

La exergía del aire, tomado del ambiente, la exergía es cero. Por otra parte, la exergía del agua de alimentación y del vapor se calcula mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 19 Exergía del agua y vapor de agua

$$\dot{X}_{H_2O} = \dot{m}_{H_2O} [(h - T_0 s) - (h_0 - T_0 s_0)] \quad (19)$$

Para el cálculo de la exergía de los gases de combustión se requiere de la temperatura y presión de los gases de combustión. Además, utilizando las fórmulas presentadas en [27], la exergía total en los gases de escape puede calcularse como la sumatoria de tres contribuciones, que pueden denominarse como térmica, presión y química. Por otra parte su exergía química es interpretada por la energía que requiere una sustancia y esta se define como el cambio de energía de Gibbs en el estado muerto de la reacción de formación de dicha sustancia a partir de los componentes de referencia del ambiente de referencia [28]. Considerando los gases de combustión como gases ideales la exergía se calcula como:

Ecuación 20 Exergía Térmica de los gases de combustión

$$\dot{X}_{Tg} = \dot{m}_g \int_{T_0}^{T_g} C_{pg} \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) dT \quad (20)$$

Ecuación 21 Exergía Presión de los gases de combustión

$$\dot{X}_{Pg} = \dot{m}_g \bar{R} T_0 \ln\left(\frac{P_g}{P_0}\right) \quad (21)$$

Ecuación 22 Exergía Química de los gases de combustión

$$\dot{X}_{Cg} = \sum \dot{m}_{Xi} \left[\frac{(\bar{g}_f^\circ + \bar{R}T_0 \ln(n_i))(1000)}{M_{Xi}} \right] \quad (22)$$

Ecuación 23 Exergía Total de los gases de combustión

$$\dot{X}_g = \dot{X}_{Tg} + \dot{X}_{Pg} + \dot{X}_{Cg} \quad (23)$$

Por último se debe tener en cuenta la pérdida de exergía por la transferencia de calor de la superficie de la caldera al ambiente. Por lo tanto la ecuación por pérdida de calor es:

Ecuación 24 Exergía perdida por transferencia de calor

$$\dot{X}_L = \left(1 - \frac{T_0}{T_k} \right) * \dot{Q}_k \quad (24)$$

Obteniendo todas las pérdidas de exergía alrededor del sistema de control, el balance exergético de la caldera se puede determinar cómo:

Ecuación 25 Exergía perdida por transferencia de calor

$$\dot{X}_{d,caldera} = \dot{X}_{in} - \dot{X}_{out} = \dot{X}_c + \dot{X}_a + \dot{X}_{H20L} - \dot{X}_{H20V} - \dot{X}_g - \dot{X}_L \quad (25)$$

15 RESULTADOS

En las tablas 5, 6 y 7 se presentan los resultados de los cálculos de exergía de entrada, de salida y exergías destruidas en los equipos del sistema, para las tres velocidades de operación estudiadas.

Como se puede observar, el balance porcentual de exergía muestra que la mayor parte de esta se pierde en los procesos de transferencia de energía, tanto en la caldera como en la turbina y en el condensador

Tabla 7 Balance exergético régimen 5000 RPM.

Entrada de Exergía por calor (kW)		
Caldera	54.63	99.96 %
Entrada de Exergía por trabajo (kW)		
Bomba	0.02	0.04 %
TOTAL, ENTRADAS	54.65	100.00 %
Salida de Exergía como Trabajo (kW)		
Turbina	2.72	4.98 %
Exergía destruida (kW)		
Caldera	33.68	61.62 %
Sobrecalentador	3.44	6.29 %
Turbina	8.67	15.86 %
Condensador	6.14	11.24 %
Bomba	0.00	0.00 %
TOTAL, DESTRUIDA	51.93	95.02 %
TOTAL, SALIDA + DESTRUIDA	54.65	100.00 %

Fuente: elaboración propia.

Tabla 8 Balance exergético régimen 4000 RPM.

Entrada de Exergía por calor (kW)		
Caldera	55.93	99.96 %
Entrada de Exergía por trabajo (kW)		
Bomba	0.02	0.04 %
TOTAL, ENTRADAS	55.96	100 %
Salida de Exergía como Trabajo (kW)		
Turbina	3.14	5.62 %
Exergía destruida (kW)		
Caldera	34.87	62.31 %
Sobrecalentador	5.89	10.52 %
Turbina	8.55	15.27 %
Condensador	3.51	6.28 %
Bomba	0.00	0.00 %
TOTAL, DESTRUIDA	52.81	94.38 %
TOTAL, SALIDA + DESTRUIDA	55.96	100.00 %

Fuente: elaboración propia.

Comparativamente entre las velocidades de operación de 5000RPM y 4000 RPM se observa una diferencia en los valores de eficiencia térmica, potencia de salida y eficiencia isentrópica. Sin embargo, para los valores de estas entre las velocidades de 4000 RPM y 3000 RPM no se encuentran diferencias. Esto último puede darse por un error en el registro de los datos de las propiedades en la corrida experimental con 3000 RPM. El comportamiento de la potencia de salida y de la eficiencia térmica

frente al régimen de giro de la turbina se presenta en las Figuras 5 y 6, respectivamente.

Tabla 9 Balance exergético régimen 3000 RPM.

Entrada de Exergía por calor (kW)		
Caldera	55.93	99.96 %
Entrada de Exergía por trabajo (kW)		
Bomba	0.02	0.04 %
TOTAL, ENTRADAS	55.96	100 %
Salida de Exergía como Trabajo (kW)		
Turbina	3.14	5.62 %
Exergía destruida (kW)		
Caldera	34.87	62.31 %
Sobrecalentador	5.89	10.52 %
Turbina	8.55	15.27 %
Condensador	3.51	6.28 %
Bomba	0.00	0.00 %
TOTAL, DESTRUIDA	52.81	94.38 %
TOTAL, SALIDA + DESTRUIDA	55.96	100.00 %

Fuente: elaboración propia.

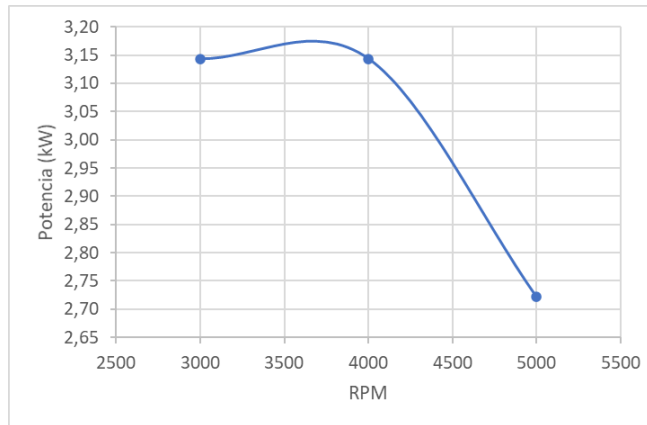


Figura 15 Gráfica de potencia de salida contra velocidad de giro de la turbina.

Fuente: Elaboración propia

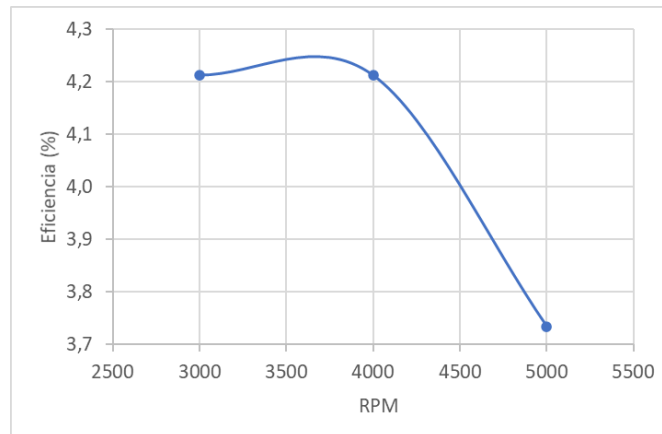


Figura 16 Gráfica de eficiencia térmica contra velocidad de giro de la turbina.

Fuente: Elaboración propia

La potencia generada y la eficiencia térmica del ciclo tienden a disminuir al aumentar la velocidad de giro de la turbina. Al solicitar mayor velocidad en el panel de control, el PLC abre la válvula de control proporcional para dejar pasar más flujo másico, esto genera que haya mayores pérdidas de calor en los dispositivos antes de la turbina, haciendo que la temperatura disminuya (como se puede ver en las propiedades del estado 2 en las Tablas 1, 2 y 3). Por lo anterior, la entalpía antes de la turbina disminuye y esta produce una menor cantidad de potencia y por lo tanto menos eficiencia.

De forma similar ocurre con la exergía disponible, al aumentar la velocidad de giro de la turbina la exergía de entrada en la caldera disminuye, y todo el sistema disminuye proporcionalmente. Se debe tener en cuenta que la turbina no está produciendo ninguna potencia útil, ya que el generador no está teniendo solicitud, y por lo tanto no genera carga sobre la turbina.

Las eficiencias de segunda ley de la termodinámica fueron de 23.90 %, 26.89 % y 26.89 % para los regímenes de velocidades de 5000 RPM, 4000 RPM y 3000 RPM, respectivamente.

En el siguiente diagrama de Sankey se puede observar de manera gráfica la distribución de los porcentajes de exergía destruida del sistema.

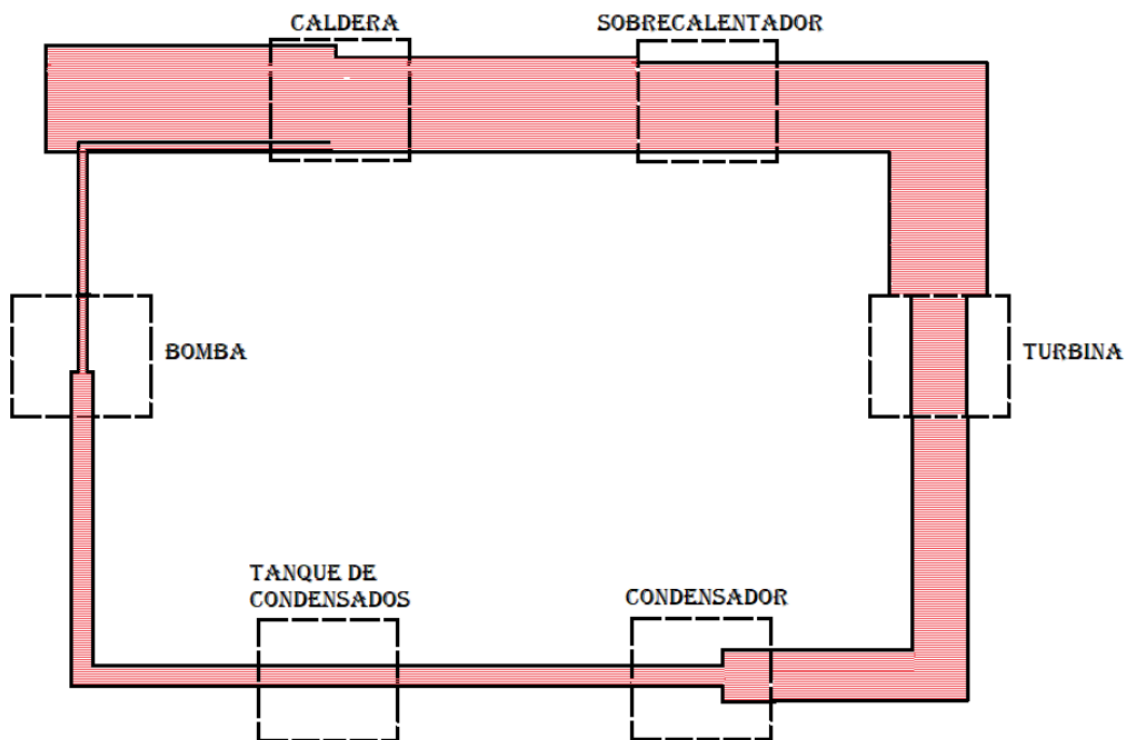


Figura 17 Diagrama de Sankey

Fuente: Elaboración propia

15.1 GUIA DE PRACTICA DE LABORATORIO GENERADA

En este apartado del documento se encuentra el cumplimiento de uno de los objetivos específicos el cual es la generación de una guía para el desarrollo de prácticas académicas en la planta térmica.

15.2 TITULO: PRACTICA DE LABORATORIO PLANTA TÉRMICA DE LA UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS (GUÍA)

15.3 OBJETIVO DE LA GUÍA (GUÍA)

Buscar que el estudiante por medio de la realización de esta práctica obtenga una visión más clara con respecto al funcionamiento de la planta térmica específicamente enfocado al funcionamiento del ciclo Rankine.

15.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS (GUÍA)

- Aplicar de manera práctica los conocimientos teóricos vistos durante las clases.
- Recopilar información que brinda la planta para con ello hacer los respectivos procedimientos matemáticos con el fin de comprobar su funcionamiento.
- Comprobar la dependencia de la potencia y la eficiencia en función de la velocidad de giro.
- Comprender el funcionamiento general de la planta térmica

15.5 TEORÍA (GUÍA)

La planta térmica de la universidad Santo Tomás está diseñada para desarrollar labores académicas con el fin de brindar una representación cercana de una planta de generación eléctrica industrial a los estudiantes. Dicha planta opera bajo el principio de funcionamiento de ciclo Rankine.



Figura 18 Vista isométrica de la planta

Fuente: Ingenium (ingeniería y consultoría LTDA) [15]

15.5.1 Ciclo Rankine

Ciclo de vapor el cual tiene como principal objetivo la conversión de calor en trabajo por medio de un sistema de equipos isobáricos e isoentrópicos utilizando agua como fluido de trabajo, este ciclo suele ser de los más utilizados en la generación de energía eléctrica debido a que su principio de funcionamiento es de los más prácticos y sencillos de implementar.

Una vez teniendo claro que la planta térmica de la USTA funciona bajo el principio del ciclo Rankine, a continuación, encontrará una tabla donde se encuentran los diferentes equipos que conforman el sistema de la planta.

Tabla 10 *Tabla de equipos de la planta térmica*

Componente	Características
Predosificador de combustible	Fabricado en acrílico con capacidad de 20 Lt y división de 10 ml
Caldera Piro tubular	6 BHP
Tanque diario para Caldera	Contiene bomba y flotador para alimentación de agua
Distribuidor de vapor	
Válvula PID	
Sobre calentador eléctrico	

Sensores de medición de presión y temperatura	
Turbina tipo Curtis	Funcionamiento por vapor, totalmente en acero inoxidable 304
Condensador de vapor	Carcaza de tubos

Fuente: elaboración propia.

Con base en los conocimientos teóricos adquiridos en clase, es claro que para la fácil comprensión del funcionamiento de los sistemas térmicos se debe tener en cuenta el diagrama de equipos del sistema a estudiar:

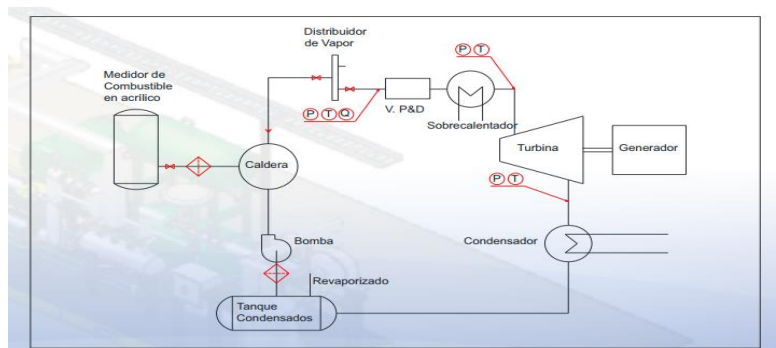


Figura 19 Diagrama de equipos de la planta térmica

Fuente: Ingenium (ingeniería y consultoría LTDA) [15]

La planta térmica de la Universidad Santo Tomás opera gracias a un sistema en conjunto de equipos termodinámicos que basan su funcionamiento en los siguientes pasos:

- Inyección de combustión a la caldera vertical que posee la planta.
- El flujo de vapor está dirigido hacia el distribuidor de vapor y seguido al sobrecalentador.
- Generación de energía eléctrica por medio de una turbina eléctrica.
- Recirculación del fluido de trabajo por medio de la operación de un condensador el cual tiene como función proporcionar el enfriamiento necesario al fluido de trabajo, para que retorne a la caldera.

Todo el funcionamiento de la planta se controla por medio de un PLC el cual brinda la capacidad de evidenciar las diferentes variables que se hacen presentes en el funcionamiento de esta.

Dichas variables son:

- Flujo másico
- Variación de velocidad de giro de la turbina
- Propiedades de estados
- Generación de energía, entre otras características.

15.6 PROCEDIMIENTO (GUIA)

Con el fin de comprender el funcionamiento de la planta y obtener los datos de funcionamiento de esta se realizará el siguiente procedimiento para 3 diferentes regímenes de trabajo de la planta

1. Por medio del display de la planta térmica asegúrese de que la turbina de la planta térmica este girando a velocidad constante dependiendo la velocidad que sea requerida.
2. Designe el número y orden a los estados en el diagrama de equipos para proceder con la toma de datos.
3. Tome los datos de presión y temperatura para cada estado y diligéncielos en la tabla 1

Tabla 11 Tabla para diligenciamiento de información de temperatura y presión de los estados a determinada velocidad de giro

Indique la velocidad de giro de la turbina	rpm
--	-----

Estado	Presión	Temperatura
1		
2		
3		
4		
5		
6		

Fuente: elaboración propia.

- Con base en los datos anteriormente diligenciados y con los conocimientos adquiridos durante las clases teóricas diligencie la tabla 2.

Tabla 12 Tabla de propiedades de los estados

Estado	Presión (kPa)	Temperatura (°C)	Fase	Entalpía (kJ/kg)	Entropía (kJ/kg*K)
1					
2					
3					
4					
5					
6					

Fuente: elaboración propia.

- Realice una tabla comparativa entre los datos obtenidos de manera práctica y los datos implementados en un ciclo por medio de software (Puede utilizar CyclePad ó TermoGraf).
- Tome los datos de presión y temperatura para cada estado y diligéncielos en la tabla 3.

Tabla 13 Tabla para diligenciamiento de información de temperatura y presión de los estados a determinada velocidad de giro

Indique la velocidad de giro de la turbina	rpm
--	-----

Estado	Presión	Temperatura
1		
2		
3		
4		
5		
6		

Fuente: elaboración propia.

- Con base en los datos anteriormente diligenciados y con los conocimientos adquiridos durante las clases teóricas diligencie la tabla 4.

Tabla 14 Tabla de propiedades de los estados

Estado	Presión (kPa)	Temperatura (°C)	Fase	Entalpía (kJ/kg)	Entropía (kJ/kg*K)
1					
2					
3					
4					
5					
6					

Fuente: elaboración propia.

- Realice una tabla comparativa entre los datos obtenidos de manera práctica y los datos implementados en un ciclo por medio de software (Puede utilizar CyclePad ó TermoGraf).
- Tome los datos de presión y temperatura para cada estado y diligéncielos en la tabla 5.

Tabla 15 Tabla para diligenciamiento de información de temperatura y presión de los estados a determinada velocidad de giro

Indique la velocidad de giro de la turbina	rpm
--	-----

Estado	Presión	Temperatura
1		
2		
3		
4		
5		
6		

Fuente: elaboración propia.

10. Con base en los datos anteriormente diligenciados y con los conocimientos adquiridos durante las clases teóricas diligencie la tabla 6.

Tabla 16 Tabla de propiedades de los estados

Estado	Presión (kPa)	Temperatura (°C)	Fase	Entalpía (kJ/kg)	Entropía (kJ/kg*K)
1					
2					
3					
4					
5					
6					

Fuente: elaboración propia.

11. Realice una tabla comparativa entre los datos obtenidos de manera práctica y los datos implementados en un ciclo por medio de software (Puede utilizar CyclePad ó ThermoGraf).

15.7 ANÁLISIS EXERGÉTICO DE LA PLANTA (GUÍA)

Determine la exergía de flujo de cada estado considerando las propiedades termodinámicas del estado muerto alrededor de la planta $T_0 = 298.15\text{ K}$ y $P_0 = 101.325\text{ kPa}$ mediante la siguiente ecuación.

$$\psi_n = (h_n - h_0) - T_0(s_n - s_0)$$

Ecuación. Exergía de Flujo

15.8 ANÁLISIS DE RESULTADOS (GUÍA)

Escriba en este apartado la comparación de los resultados entre los 3 regímenes de trabajo utilizados teniendo en cuenta todas las variaciones e interpretación de los resultados obtenidos.

15.9 CONCLUSIONES (GUÍA)

Con base en la experiencia vivenciada con la realización de la práctica en la planta térmica de la USTA escriba las conclusiones con respecto a todo el procedimiento.

16 BIBLIOGRAFIA

- [1] D. Semana, «Semana,» 7 07 2015. [En línea]. Available: <https://www.semana.com/economia/articulo/analisis-produccion-energetica-del-pais-su-competitividad/211733/>. [Último acceso: 27 01 202].
- [2] M. A. B. Yanus A. Cengel, Termodinamica Ocatava Edicion, Mc Graw Hill Education.
- [3] D. S. Amaya, «Análisis y optimizacion exergetica de una planta,» Pereira, 2014.
- [4] A. E. ARBELAEZ, ANALISIS EXÉRGETICO Y TERMOECOLOGICO DE UNA CALDERA ACUOTUBULAR DE BAGAZO Y CARBON DE UN INGENIO AZUCARERO DEL VALLE DEL CAUCA, CALI , 2017 .
- [5] M. F. -. M. Costea, Energy and Exergy Analysis and Optimization of Combined, 2012 .
- [6] C. O. O. -. A. O. Onokwai, Enhancing the Performance of 75mw Steam Power Plant with, 2015.
- [7] L. -. WEPFER, «Application of the second law to the analysis of energy systems,» 1979 .
- [8] J. SZARGUT, . International progress in second law analysis. Energy, 1980.
- [9] T. KOTAS, J. Exergy method of thermal and chemical plant analysis, 1986.
- [10] TSATSARONIS, Review of exergoeconomics Methodologies. IV International, Roma, 1987.
- [11] V. -. A. Y. MARTINEZ, Inventory of the exergy resources on earth including its mineral capital, Medellin, 2011.
- [12] S. R. CALVO, Análisis exnergetico, exergético y económico de una planta geotermica de generación de energía eléctrica en España.
- [13] A. E. Arbelaez, Análisis exergético termo ecologico de una caldera acuotubular de bagazo y de carbon en un ingenio azucarero en el Valle del Cauca, SANTIAGO DE CALI, 2017.
- [14] D. LEAL, Aplicación del análisis exergetico a una instalación de producción de hidrocarburos de Ecopetrol S.A., BOGOTA, 2017.
- [15] I. Y. C. LTDA, «Información técnica planta térmica».
- [16] S. K. y. D. A. Som, thermodynamic irreversibilities and exergy balance in, 2008.

- [17] Semana, «Diario Semana,» 7 07 2015. [En línea]. Available: <https://www.semana.com/economia/articulo/analisis-produccion-energetica-del-pais-su-competitividad/211733/>. [Último acceso: 27 01 202].
- [18] R. e. a. Lugo, «Análisis exergetico de una central termoelectrica,» de *Análisis exergetico de una central termoelectrica*, 2009.
- [19] M. Feidt, *Thermodynamique et optimisation des systèmes et procédés*, 1996.
- [20] R. e. a. Lugo, «Análisis exergetico de una central termoelectrica,» de *Análisis exergetico de una central termoelectrica*, 2009, pp. 17-25.
- [21] C. n. p. e. a. d. energia, *Eficiencia en calderas y combustion*, Mexico , 2007 .
- [22] M. Aljundi, «Energy and exergy analysis of a steam power plant in Jordan applied Thermal Engineering,» 2009, pp. 324-328.
- [23] M. y. G.-B. M. Ebadi, «Exergetic analysis of gas turbine plants,» 2005, pp. 31-39.
- [24] S. e. a. Kaushik, «Energy and exergy analyser of thermal power plant: A,» 2011, pp. 1857 - 1872.
- [25] G. y. M. T. Tsatsaronis, «Advanced exergetic analysis of a novel system for generating electricity and vaporizing liquefied natural gas,» 2010, pp. 820 -829.
- [26] J.I. Noriega - B.A. Contreras - B. Romero - J.C. Paredes - G. Urriolagoitia, <<La importancia de la composición química en los biocombustibles de aceite de colza y ricino en la generación de agua durante la combustión,>> 2020, pp. 525-532.
- [27] Gaggioli, R.A., ed., *Thermodynamics: Second Law Analysis*. American Society Symposium Series 122, p. 52. (1980).
- [28] A. Santamaría – A.F. Bedoya Caro – I. Santamaría – J. Ramiro, << Análisis exergetico de un motor de automoción operando con gas natural: efecto de la configuración del kit de conversión y del sistema de encendido,>>2006, pp. 40-52.

17 CONCLUSIONES

- Se realizó el análisis por primera y segunda ley de la termodinámica de la planta térmica de la Universidad Santo Tomás. Las eficiencias térmicas arrojaron valores por debajo del 5% y las potencias generadas en la turbina del orden de 2 a 3 kW. El análisis exergético permitió identificar que la principal fuente de irreversibilidades es el proceso de combustión en la caldera, seguido por los procesos de pérdidas de calor en la turbina y el condensador. Lo anterior para las tres velocidades de turbina estudiadas.
- El comportamiento termodinámico del ciclo de la planta indica que todos los parámetros calculados disminuyen al aumentar la velocidad de giro solicitada en la turbina. El análisis parece indicar que el aumento del flujo másico establecido por el PLC genera mayores pérdidas de calor y por lo tanto irreversibilidades en todo el sistema.
- Con base en la gráfica de eficiencia vs velocidad de giro se puede evidenciar que el punto donde más eficiencia se obtiene se aproxima entre 3500 rpm y 4000 rpm
- Con base en la gráfica de potencia vs velocidad de giro se puede evidenciar que el punto donde más eficiencia se obtiene se aproxima entre 3.15 kW y 3.2 kW.
- Se evidencia que la exergía destruida en el equipo generador de electricidad (Turbina) no tiene un cambio significativo en relación a los 3 regímenes de trabajo estudiados.
- Con base en la investigación realizada se plantea una guía de practica de laboratorio la cual permita brindar a los estudiantes un paso a paso organizado de la aplicación de la teoría vista en las aulas y que los direcciona

a concluir acerca del estado de la misma y los diferentes parámetros que influyen en el funcionamiento de la misma.

- En la medida en que no se puedan controlar los parámetros de medición en la planta térmica, los resultados de las diferentes pruebas de laboratorio realizadas allí, serán menos veraces y de baja confiabilidad.
- Se debe tener un plan de mantenimiento el cual brinde a la planta un respaldo operacional debido a que al día de hoy cuenta con fallos considerablemente perjudicables en la operación de la misma.

18 ANEXOS

18.1 TABLA DE PROPIEDADES PARA LOS DIFERENTES REGÍMENES DE TRABAJO

Tabla 17 Exergía destruida en equipos para 5000 rpm

Exergía destruida (kW)		
Caldera	33.68	61.62 %
Sobrecalentador	3.44	6.29 %
Turbina	8.67	15.86 %
Condensador	6.14	11.24 %
Bomba	0.00	0.00 %
TOTAL, DESTRUIDA	51.93	95.02 %
TOTAL, SALIDA + DESTRUIDA	54.65	100.00 %

Fuente: Elaboración propia

Tabla 18 Exergía destruida en equipos para 4000 rpm

Exergía destruida (kW)		
Caldera	34.87	62.31 %
Sobrecalentador	5.89	10.52 %
Turbina	8.55	15.27 %
Condensador	3.51	6.28 %
Bomba	0.00	0.00 %
TOTAL, DESTRUIDA	52.81	94.38 %
TOTAL, SALIDA + DESTRUIDA	55.96	100.00 %

Fuente: Elaboración propia

Tabla 19 Exergía destruida en equipos para 3000 rpm

Exergía destruida (kW)		
Caldera	34.87	62.31 %
Sobrecalentador	5.89	10.52 %
Turbina	8.55	15.27 %
Condensador	3.51	6.28 %
Bomba	0.00	0.00 %
TOTAL, DESTRUIDA	52.81	94.38 %
TOTAL, SALIDA + DESTRUIDA	55.96	100.00 %

Fuente: Elaboración propia

A continuación se anexan las tablas de propiedades para los diferentes estados para los diferentes regímenes de trabajo, dicho proceso fue realizado con base en el software Termograf .

Tabla 20 Propiedades para el estado 1 y 5 – 5000 RPM – Software Termograf

Est.5		Est.1	
P	20	P	750
v	1.017E-3	v	0.25569
T	60	T	167.9
u	252.037	u	2574.11
h	251.97	h	2765.88
s	0.83	s	6.70301

Fuente: Elaboración propia

Tabla 21 Propiedades para el estado 2 y 3 – 5000 RPM – Software Termograf

Est.2		Est.3	
P	310	P	20
v	0.59885	v	8.11739
T	141.5	T	80
u	2555.27	u	2484.71
h	2740.92	h	2647.06
s	7.01663	s	8.0192

Fuente: Elaboración propia

Tabla 22 Propiedades para el estado 4 y 6 – 5000 RPM – Software Termograf

Est.4		Est.5	
P	20	P	750
v	1.017E-3	v	1.017E-3
T	60.0206	T	60.1
u	251.949	u	252.037
h	251.97	h	252.8
s	0.83374	s	0.834

Fuente: Elaboración propia

Tabla 23 Propiedades para el estado 1 – Para 4000 y 3000 RPM – Software Termograf

Est.1	
P	750
v	0.25569
T	167.9
u	2574.11
h	2765.88
s	6.70301

Fuente: Elaboración propia

Tabla 24 Propiedades para el estado 2 y 3 – Para 4000 y 3000 RPM – Software Termograf

Est.2		Est.3	
P	160	P	10
v	1.18295	v	16.2666
T	143.1	T	80
u	2567.72	u	2485.93
h	2756.99	h	2648.6
s	7.35404	s	8.34255

Fuente: Elaboración propia

Tabla 25 Propiedades para el estado 4 y 6 – Para 4000 y 3000 RPM – Software Termograf

Est.4		Est.6	
P	10	P	750
v	1.01E-3	v	0.25569
T	60	T	167.9
u	191.85	u	2574.11
h	191.86	h	2765.88
s	0.64938	s	6.70301

Fuente: Elaboración propia

Tabla 26 Propiedades para el estado 5 – Para 4000 y 3000 RPM – Software Termograf

Est.5	
P	10
v	1.01E-3
T	60
u	191.85
h	191.86
s	0.64938

Fuente: Elaboración propia