

**“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA CENTRAL DE VAPOR
EXPERIMENTAL A DIFERENTES CARGAS ELÉCTRICAS CON COMBUSTIBLE GLP”**

UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK

FACULTAD DE INGENIERIA Y CIENCIAS APLICADAS

Trabajo de Fin de Carrera Titulado:

**“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA CENTRAL DE
VAPOR EXPERIMENTAL A DIFERENTES CARGAS ELÉCTRICAS CON
COMBUSTIBLE GLP”**

Realizado por:

FERNANDO VINICIO GOMEZ DALGO

Director del Proyecto:

Ing. Edilberto Antonio Llanes Cedeño, Ph.D.

Como requisito para la obtención del título de:

**MASTER EN ECOEFICIENCIA INDUSTRIAL
CON MENCIÓN EN EFICIENCIA ENERGÉTICA**

Quito, marzo de 2021

**“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA CENTRAL DE VAPOR
EXPERIMENTAL A DIFERENTES CARGAS ELÉCTRICAS CON COMBUSTIBLE GLP”**

DECLARACION JURAMENTADA

Yo, FERNANDO VINICIO GOMEZ DALGO, con cédula de identidad # 170851798-0, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado a calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración, cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.



FIRMA

C.I. 170851798-0

**“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA CENTRAL DE VAPOR
EXPERIMENTAL A DIFERENTES CARGAS ELÉCTRICAS CON COMBUSTIBLE GLP”**

DECLARATORIA

El presente trabajo de investigación titulado:

**“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENÉRGICA EN UNA CENTRAL DE
VAPOR EXPERIMENTAL A DIFERENTES CARGAS ELÉCTRICAS CON
COMBUSTIBLE GLP”**

Realizado por:

FERNANDO VINICIO GOMEZ DALGO

Como Requisito para la Obtención del Título de:

**MASTER EN ECOEFICIENCIA INDUSTRIAL
CON MENCIÓN EN EFICIENCIA ENERGÉTICA**

Ha sido dirigido por el profesor

EDILBERTO ANTONIO LLANES CEDEÑO

Quien considera que constituye un trabajo original de su autor



FIRMA

**“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA CENTRAL DE VAPOR
EXPERIMENTAL A DIFERENTES CARGAS ELÉCTRICAS CON COMBUSTIBLE GLP”**

LOS PROFESORES INFORMANTES

Los Profesores Informantes:

Mg. JEFFERSON RUBIO

PhD. JAVIER MARTÍNEZ

Después de revisar el trabajo presentado,

Lo han calificado como apto para su defensa oral ante
el tribunal examinador



FIRMA



FIRMA

Quito, marzo de 2021

**“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA CENTRAL DE VAPOR
EXPERIMENTAL A DIFERENTES CARGAS ELÉCTRICAS CON COMBUSTIBLE GLP”**

DEDICATORIA

A Dios.

A mis padres, porque siempre me han acompañado durante toda mi vida. Por ser mi ejemplo, fortaleza, apoyo y orgullo, por enseñarme a que se puede lograr lo que uno se propone por difícil que sea.

**“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA CENTRAL DE VAPOR
EXPERIMENTAL A DIFERENTES CARGAS ELÉCTRICAS CON COMBUSTIBLE GLP”**

AGRADECIMIENTO

A mi esposa y mis hijos por acompañarme en esta experiencia paso a paso

A mis hermanos

A la Universidad Internacional SEK por aportar en mi formación

A mis amigos y compañeros de aula

A mi tutor Edilberto Antonio Llanes Cedeño, por su gran aporte en esta investigación

A mis profesores

Gracias

“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA CENTRAL DE VAPOR EXPERIMENTAL A DIFERENTES CARGAS ELÉCTRICAS CON COMBUSTIBLE GLP”

RESUMEN

En la actualidad, es de gran importancia el conocimiento de la producción de energía y, por tanto, las eficiencias de los equipos que lo producen. La implementación de laboratorios para estudios energéticos en las universidades ayuda a los estudiantes a conseguir experticia en eficiencia energética. El objetivo en el presente trabajo fue evaluar la eficacia de una central de vapor térmica con fines didácticos, bajo el empleo de gas combustible GLP y variación de cargas eléctricas continuas, con miras a su implementación en los estudios académicos de pregrado y posgrado. La metodología aplicada fue de tipo experimental en base a la observación y medición, por lo que se puso en marcha la central de vapor hasta que alcance un estado estable, se realizó mediciones de parámetros importantes como: temperaturas, presiones, condensado, caudales de agua y gas combustible. Los resultados obtenidos son de una eficiencia energética del sistema de 0 % cuando no existe carga eléctrica, 0,10 % cuando se ajusta a 2 cargas eléctricas y 0,11 % a 3 cargas eléctricas. En relación a la eficiencia exergética del sistema se determinó un 0,28 % sin carga eléctrica, 0,30 % para 2 cargas eléctricas y 0,36 % calibrado con 3 cargas eléctricas. Además, la eficiencia energética del caldero es del 69,85% sin carga eléctrica, 65,92% con 2 cargas eléctricas y 64,93% al conectar 3 cargas eléctricas. En cuanto a la eficiencia exergética del caldero es de 29,90% sin carga, 32,93% con 2 cargas y 32,83% con 3 cargas eléctricas. Por tanto, al evaluar los valores antes indicados, se determinó que el rendimiento exergético es superior al rendimiento energético en cada procedimiento, lo cual indica que el sistema es ineficiente y puede existir oportunidad de mejoramiento exergético, aprovechando la exergía que se destruye y transformarla en energía útil.

Palabras clave: central térmica, energía, exergía, eficiencia

**“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA CENTRAL DE VAPOR
EXPERIMENTAL A DIFERENTES CARGAS ELÉCTRICAS CON COMBUSTIBLE GLP”**

ABSTRACT

Nowadays, it is of great importance the knowledge of energy production and, therefore, the efficiencies of the equipment that produce it. The implementation of laboratories for energy studies in universities helps students to gain expertise in energy efficiency. In the present work, the performance of an experimental thermal steam power plant was evaluated by means of energy and exergy balance, under the consumption of LPG fuel gas and a variation of continuous electrical loads, with a view to its implementation in undergraduate and graduate academic studies. The methodology applied was experimental based on observation and measurement, so the steam plant was started up until it reached a stable state, and measurements were taken of important parameters such as: temperatures, pressures, condensate, water and fuel gas flow rates. The results obtained are an energy efficiency of the system of 0 % when there is no electrical load, 0.10 % when adjusted to 2 electrical loads and 0.11 % at 3 electrical loads. In relation to the system's exergy efficiency, 0.28 % was determined with no electrical load, 0.30 % for 2 electrical loads and 0.36 % calibrated with 3 electrical loads. In addition, the energy efficiency of the boiler is 69.85% with no electrical load, 65.92% with 2 electrical loads and 64.93% when 3 electrical loads are connected. As for the energy efficiency of the boiler, it is 29.90% with no load, 32.93% with 2 loads and 32.83% with 3 electrical loads. Therefore, when evaluating the above values, it was determined that the exergy efficiency is higher than the energy efficiency in each process, which indicates that the system is inefficient and there may be an opportunity for exergy improvement, taking advantage of the exergy that is being destroyed to convert it into useful work.

Key words: thermal power plant, energy, exergy, efficiency.

“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA CENTRAL DE VAPOR EXPERIMENTAL A DIFERENTES CARGAS ELÉCTRICAS CON COMBUSTIBLE GLP”

INTRODUCCION

Actualmente, las técnicas de gestión energética son herramientas importantes para la eficiencia energética, las cuales requieren conocimiento de las ciencias térmicas a nivel universitario. El uso eficiente de la energía hoy más que nunca, contribuirá a dejar a nuestras futuras generaciones un espacio donde puedan vivir mejor quizá (Palacios, Peña, y Hidalgo, 2015).

Es importante resaltar la utilidad de estudiar los procesos de generación de vapor a nivel de laboratorio, para lo cual la Universidad Internacional SEK – Campus Carcelén, ha realizado la adquisición de un sistema de vapor experimental “central de vapor con máquina de vapor”, la cual básicamente se compone de una caldera, máquina de vapor, generador eléctrico de corriente continua, condensador, depósito de agua, bomba de agua de alimentación y con entrada para combustible en forma de gas.

Con fines educativos la empresa Turbine Technologies Ltd., distribuye un equipo denominado Rankine CyclusTM, el cual se trata de una central de vapor para generación de electricidad, permite a los estudiantes tener una experiencia sólida y práctica relacionada con la eficiencia energética, el sistema incluye componentes iguales a un sistema real, incluye sistema de adquisición de datos y paneles de instrumentación, los estudiantes podrán analizar los parámetros importantes, tal como, energía del combustible, flujo de calor, eficiencia del generador, eficiencia total del sistema (Turbine Technologies Ltd., 2013).

En un estudio, cuyo objetivo fue valorar cómo se comporta un motor de combustión interna de ciclo Otto por medio de balances de energía y exergía para evaluar su rendimiento; consideraron un motor de 1.6 L. Luego de investigar de manera experimental, realizando observación y medición, determinaron, que el balance energético y exergético admiten valorar la eficiencia real de un MCI (Llanes, Carguachi, y Rocha, 2018).

“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA CENTRAL DE VAPOR EXPERIMENTAL A DIFERENTES CARGAS ELÉCTRICAS CON COMBUSTIBLE GLP”

López, García y Convertini (2017) indican lo importante de la eficiencia en una caldera, ya que su influencia en el ahorro de energía es determinante, indicando que la transferencia de calor al agua hay que maximizarla y las pérdidas características de este tipo de equipo minimizarlas.

Según Gómez y Avila (2016) un equipo generador de vapor en sí es un dispositivo que transforma la energía, transfiere el calor originado por combustión de algún combustible para producir vapor y luego ser aprovechado en algún proceso.

Pineda, Fabian, Hernández, y Hugo (2017) señalan que las aplicaciones típicas de los generadores de vapor en la industria son: Alimenticia, textil, cervecera, hospitalaria, generadoras de electricidad, refinerías de petróleo, entre otras.

En la investigación realizada por Manzuera, Rojas, y Castang (2014) hacen uso de una caldera de 30 BHP pirotubular, le trabajan sobre un diagnóstico de exergía y transferencia de calor, con la finalidad de determinar ahorros potenciales de energía.

Pineda y otros (2017) desarrollaron una metodología para determinar el rendimiento energético y exergético de calderas pirotubulares, que son calificadas como de baja potencia, que se encuentra ubicada en la División de Ingenierías del Campus Irapuato – Salamanca de la Universidad de Guanajuato.

En la Universidad ECCI Bogotá – Colombia existe una central de vapor para producir energía eléctrica, Gómez y Avila (2016) le trabajaron con aplicación de un balance exergético para establecer las irreversibilidades, así como también, las ineficiencias. Concluyen que algunos desarrollos teóricos pueden mejorar el rendimiento de los componentes, con la finalidad de favorecer la eficiencia total del sistema, para no realizar variaciones físicas sobre la planta generadora de vapor.

“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA CENTRAL DE VAPOR EXPERIMENTAL A DIFERENTES CARGAS ELÉCTRICAS CON COMBUSTIBLE GLP”

La falta de información y capacitación, son obstáculos que impiden las inversiones para eficiencia energética por parte de los responsables de toma de decisiones, por lo que, implementar auditorías energéticas permitirá institucionalizar los asuntos energéticos como políticas empresariales, lo cual ayudará a conocer de estándares y certificaciones. Además, modelos de financiamiento alternativos ayudarán frente a presupuestos de inversión limitados (International Energy Agency, 2018) .

La eficiencia energética se entiende como el uso eficiente de la energía, además, se pueden obtener los mismos bienes o servicios utilizando menos energía, tomando en cuenta que no debe afectar el confort, calidad de vida o productividad (Peláez y Espinoza, 2015).

Básicamente, un generador de vapor tiene a cargo la producción de vapor para ser utilizado en la generación mecánica o eléctrica y para la alimentación a equipos de proceso. La industria necesita energía para su funcionamiento, habitualmente en su forma primaria, a modo de calor o electricidad (González, 2015).

A través de variables medibles en una central térmica de vapor, se puede establecer y cuantificar los rendimientos energéticos y exergéticos, para estudiar su comportamiento operativo, con el fin de determinar oportunidades de ahorro (López y otros, 2017).

La generación de vapor es el proceso de transformar el agua en vapor, existen 2 tipos de generadores muy utilizados que son: Piro tubulares, también conocidos como calderas de tubos y Acuotubulares que se utilizan cuando se requieren elevadas presiones y rendimiento (Miranda, 2018).

Para una caldera, la eficiencia energética está determinada por la relación entre la energía útil, es decir, la energía del vapor producido y la energía introducida al sistema que es proporcionada por el combustible (Hincapié, 2015).

“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA CENTRAL DE VAPOR EXPERIMENTAL A DIFERENTES CARGAS ELÉCTRICAS CON COMBUSTIBLE GLP”

La exergía es una propiedad que nos permite cuantificar la energía transformable en trabajo útil. El potencial de trabajo útil o exergía representa el trabajo máximo posible que puede proporcionar un sistema al ir desde un estado inicial específico a un estado final “muerto” que puede ser su medio ambiente (Kallert, Schmidt, y Bläse, 2017) .

Por lo citado previamente, se establece la importancia de evaluar la eficiencia energética y eficiencia exergética a la central de vapor experimental adquirida por la UISEK.

El objetivo general de este estudio de investigación es: Evaluar el desempeño de una central de vapor térmica experimental, bajo el consumo de gas combustible GLP y variación de cargas eléctricas continuas, para la implementación en los estudios académicos de pregrado y posgrado.

Para cumplir con el objetivo general se llevan a cabo los siguientes objetivos específicos:

- Seleccionar una metodología para el cálculo del rendimiento energético y exergético de una central de vapor experimental, por medio de la revisión de literatura acorde al objeto en estudio.
- Deducir los parámetros de densidad del combustible, caudal másico del combustible, caudal másico del vapor, a través de la central de vapor térmica experimental, para el cálculo de potencias y poder determinar las eficiencias.
- Realizar un análisis comparativo en concordancia con los datos del fabricante de la central de vapor experimental, tanto de las eficiencias energéticas, como de las eficiencias exergéticas resultantes.

“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA CENTRAL DE VAPOR EXPERIMENTAL A DIFERENTES CARGAS ELÉCTRICAS CON COMBUSTIBLE GLP”

MATERIALES Y METODO

Para alcanzar los objetivos planteados, se aplicará una investigación de manera experimental, con soporte en la observación y medición, el procedimiento permitirá la evaluación de dos parámetros que son importantes en los sistemas energéticos y que son; la eficiencia energética, así como también, la eficiencia exergética de la central térmica de vapor con máquina de vapor ET 810. En la figura 1, se presenta la metodología para determinar mencionados parámetros del sistema de vapor experimental.

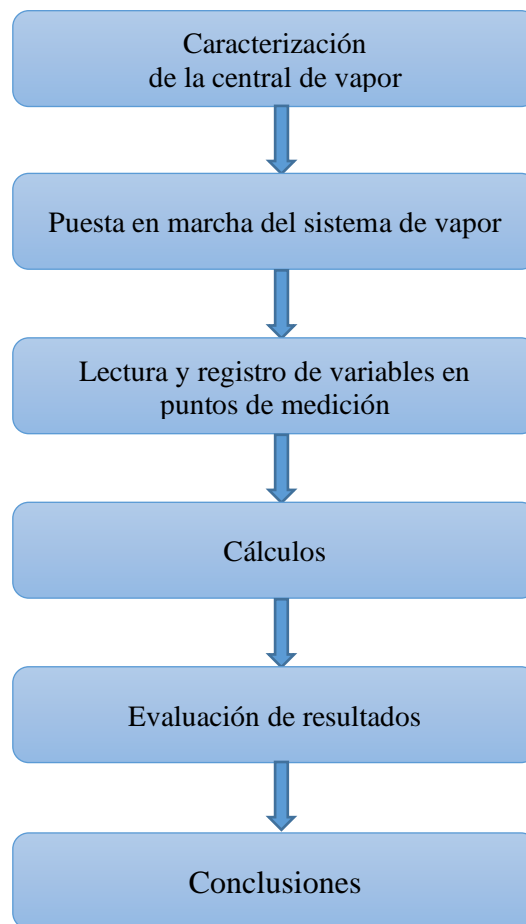


Figura 1. Método para evaluación de la eficiencia energética y exergética.

“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA CENTRAL DE VAPOR EXPERIMENTAL A DIFERENTES CARGAS ELÉCTRICAS CON COMBUSTIBLE GLP”

Caracterización de la central de vapor con máquina de vapor

Esta etapa consiste en familiarizarse con la central térmica de vapor ET 810, en la figura 2 se puede observar a la central térmica con máquina de vapor que se encuentra en los laboratorios de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Aplicadas.



Figura 2. Central térmica de vapor con máquina de vapor

En la caldera se genera vapor de agua, el cual es transportado a la máquina de vapor, el vapor que tiene energía es transformado en energía mecánica. El generador eléctrico implementado en el sistema en estudio, es un motor de corriente continua, que genera corriente debido a la energía mecánica. Existen un total de cuatro lámparas como cargas eléctricas y el vapor de condensación es refrigerado por agua a través de un condensador.

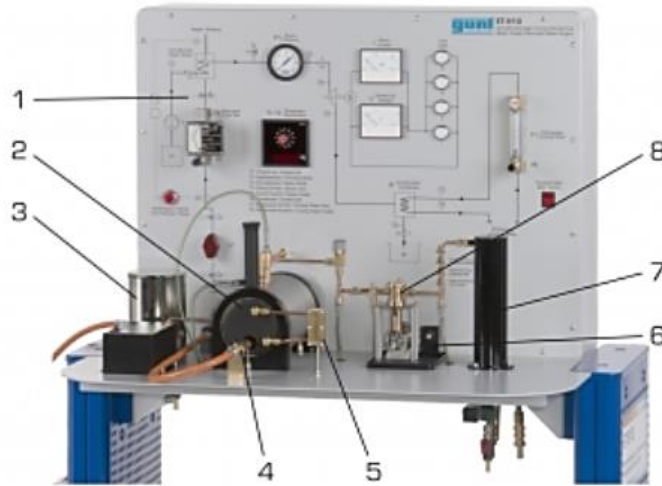
Descripción del equipo

La central de vapor experimental, está formada básicamente por una caldera, una máquina de vapor de émbolo de un cilindro, un generador, un condensador, un depósito de agua de alimentación y una bomba para alimentación de agua. La caldera es calentada por gas combustible (G.U.N.T. Geratebau GmbH, 2018).

“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA CENTRAL DE VAPOR EXPERIMENTAL A DIFERENTES CARGAS ELÉCTRICAS CON COMBUSTIBLE GLP”

La energía eléctrica es generada debido a la energía mecánica. Además, el vapor de escape atraviesa un condensador enfriado por agua.

En la figura 3, se observa los principales elementos de la central de vapor ET 810.



1. Esquema del proceso con elementos de indicación y mando
2. Caldera de vapor
3. Depósito de agua de alimentación
4. Quemador
5. Indicación del nivel de agua en la caldera
6. Generador
7. Condensador
8. Máquina de vapor

Figura 3. Descripción de la central térmica de vapor con máquina de vapor ET-810. (G.U.N.T., 2015)

En cuanto al alcance, este estudio es de tipo experimental, se lo realiza de una manera controlada, con lo cual se obtienen resultados para análisis y discusión.

Para esto, se recurrió a los materiales e instrumentos descritos a continuación:

- Central térmica de vapor experimental ET 810, como sistema de estudio
- Gas GLP como combustible
- Agua destilada para llenado de caldera
- Toma de agua pública, como refrigerante

“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA CENTRAL DE VAPOR EXPERIMENTAL A DIFERENTES CARGAS ELÉCTRICAS CON COMBUSTIBLE GLP”

Puesta en marcha del sistema de vapor

El procedimiento seguido se describe a continuación:

- Realizar la conexión eléctrica del equipo, pero coincidiendo los parámetros eléctricos con las indicadas en la placa del equipo
- Conectar la toma de agua refrigerante con la toma de agua pública, la salida de agua refrigerante debe estar conectada a un drenaje o sumidero
- Conectar la bombona de gas
- Cargar el tanque de alimentación con agua destilada.

Para arrancar la caldera y obtener datos, se cumplió con los siguientes pasos:

- Ajustar el caudal del gas GLP al máximo
- Ajustar el caudal del agua refrigerante a 85 l/h
- Arrancar la máquina de vapor y dejar que funcione a un número reducido de revoluciones sin carga
- Ajustar la válvula de vapor de tal modo que se mantenga a una presión de 3 bar
- Ajustar el caudal del gas a 70l/h
- Encender o no las lámparas a modo de carga eléctrica
- Colocar un depósito de medición debajo de la válvula de desagüe de condensado
- Esperar que el sistema tenga un estado estable

El tiempo aproximado de generación del primer vapor está en el rango de 5 a 10 minutos,

- Una vez alcanzado el estado estable, se procede a la toma de valores de medición

“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA CENTRAL DE VAPOR EXPERIMENTAL A DIFERENTES CARGAS ELÉCTRICAS CON COMBUSTIBLE GLP”

Lectura en puntos de medición

Mediante sensores se registra los parámetros de temperatura, presión, así como también, flujos en los puntos más importantes. En los visores se marcan los valores correspondientes, cabe mencionar que también se puede leer los valores de corriente eléctrica y voltaje del generador. Las temperaturas se miden electrónicamente a través de los termopares y un conmutador de puntos de medición. Con el sistema estable se realiza:

- Lectura y toma de apuntes de los valores en los puntos de medición
- Repetición de lectura cada 5 minutos y prestar atención a que los valores de medición cambien lo menos posible
- La finalización del proceso al cabo de 15 a 20 minutos
- Determina el volumen de condensado a través del recipiente de medición

En la figura 4 se puede identificar el panel y los puntos de medición:

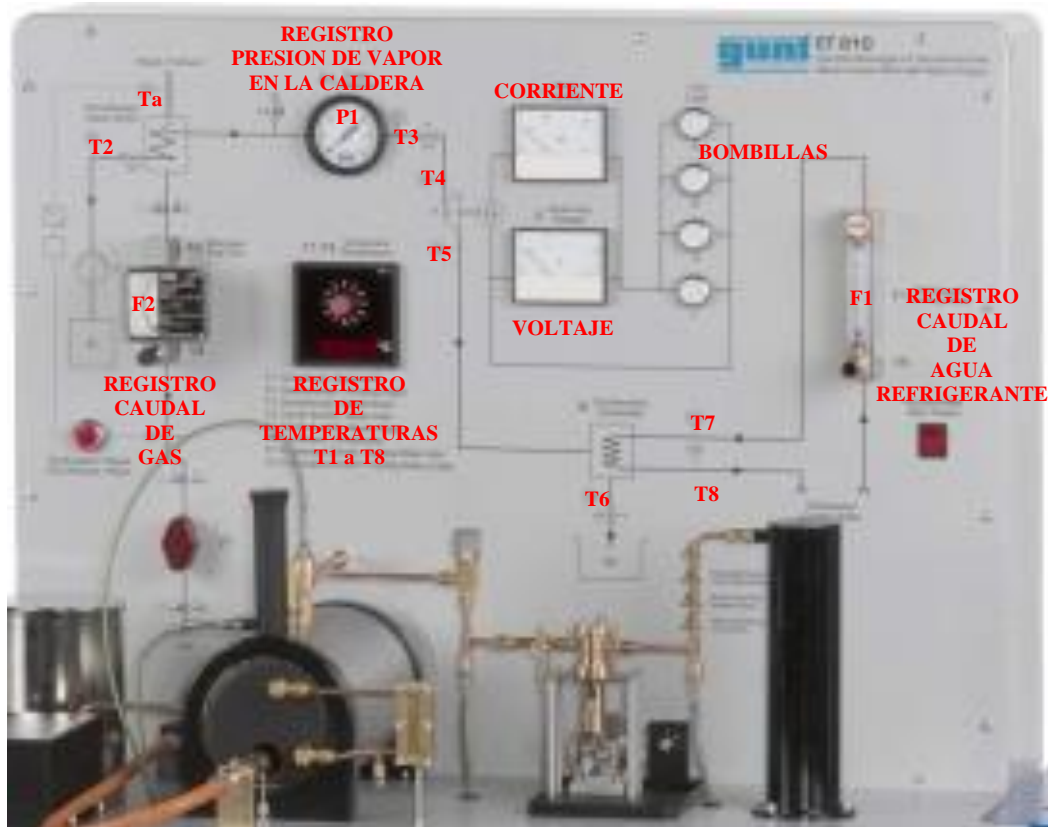


Figura 4. Panel de medición de parámetros. (G.U.N.T., 2015)

“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA CENTRAL DE VAPOR EXPERIMENTAL A DIFERENTES CARGAS ELÉCTRICAS CON COMBUSTIBLE GLP”

Donde:

T1: Temperatura ambiente o de entorno

T2: Temperatura del agua de alimentación

T3: Temperatura del vapor de la caldera

T4: Temperatura del vapor en la entrada a la máquina de vapor

T5: Temperatura del vapor en la salida de la máquina de vapor

T6: Temperatura del condensado

T7: Temperatura de entrada del agua refrigerante

T8: Temperatura de salida del agua refrigerante

Ta: Temperatura de gas de escape

P1: Presión de vapor de la caldera

F1: Caudal de agua refrigerante

F2: Caudal de gas

En este estudio se analiza con 0 cargas, 2 cargas y 3 cargas, se puede escoger la cantidad de carga con un máximo de 4 bombillas que ofrece el equipo.

Esquema y Descripción del Proceso

De acuerdo al esquema de la figura 5, se procede a describir el proceso de funcionamiento del sistema.

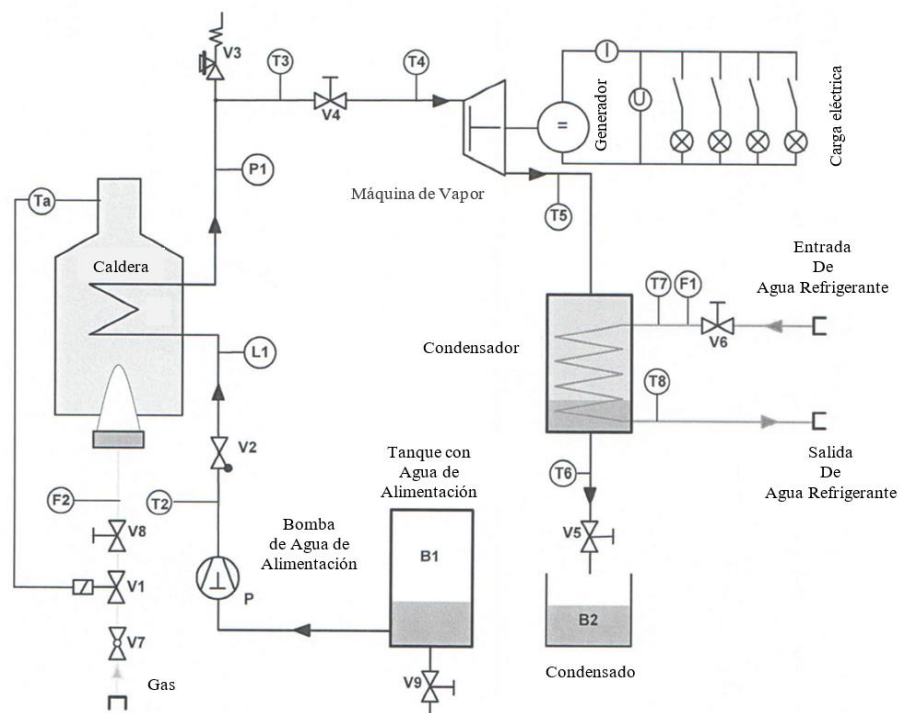


Figura 5. Esquema del proceso. (GUNT, 2015)

“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA CENTRAL DE VAPOR EXPERIMENTAL A DIFERENTES CARGAS ELÉCTRICAS CON COMBUSTIBLE GLP”

El tanque de agua destilada B1 sirve como fuente para la succión de agua por intermedio de la bomba de agua P, la cual succiona y la introduce en la caldera de manera presurizada por intermedio de la válvula principal V2, los niveles de agua se verifican en la mirilla L1. El manómetro P1 marca la presión de vapor en la caldera, la temperatura del vapor se mide a través de T3, se tiene la válvula de seguridad V3 que limita la presión, evitando valores no deseados.

El vapor es conducido a la máquina de vapor a través de la válvula V4, la temperatura del vapor que ingresa a la máquina de vapor se mide con T4 y la temperatura del vapor que sale de la máquina de vapor con T5, el vapor que sale de la máquina de vapor se desplaza hacia el condensador y este condensado se purga por intermedio de la válvula V5 que cae a un depósito de medición y la temperatura de mencionado condensado se mide con T6.

El agua refrigerante que ingresa al condensador circula desde la toma de agua del laboratorio por intermedio de la válvula de regulación V6 y el caudal es medido por F1, la temperatura de entrada del agua refrigerante se mide con T7 y la temperatura de salida con T8, además, la salida de agua refrigerante es conectada a un sumidero en el exterior del laboratorio. El gas de combustión (GLP) circula por la llave principal V7, también por V1 que es una válvula de cierre rápido y la válvula V8 de regulación, cuyo flujo es medido por el caudalímetro F2 hasta finalmente ingresar al quemador de la caldera. El controlador de temperatura Ta supervisa la temperatura del gas de escape y la alimentación del gas puede ser desconectada por medio de la válvula V1 de cierre rápido, cuando exista algún sobrecalentamiento peligroso.

**“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA CENTRAL DE VAPOR
EXPERIMENTAL A DIFERENTES CARGAS ELÉCTRICAS CON COMBUSTIBLE GLP”**

METODOLOGÍA DE CALCULO

Para determinar la eficiencia energética, se consideran las siguientes ecuaciones generales (ecuaciones 1- 8)

Flujo másico de combustible

$$\dot{m}_{gas} = \frac{\dot{V}_{gas} * \rho_{gas}}{3600 * 1000} \left[\frac{kg}{s} \right] \quad (1)$$

La ecuación (1) calcula el caudal másico del combustible (Monteiro y Torrezani, 2015)

Donde:

\dot{m}_{gas} = flujo másico del combustible $\left[\frac{kg}{s} \right]$

\dot{V}_{gas} = volumen del gas [l/h] que se obtiene del caudalímetro F2

ρ_{gas} = densidad del gas de combustión $[kg/m^3]$ que se obtiene de cálculos o tablas.

Potencia suministrada por el combustible

$$P_{gas} = \dot{m}_{gas} * H_u \quad [w] \quad (2)$$

Donde:

P_{gas} = Potencia suministrada por el combustible [w]

\dot{m}_{gas} = flujo másico del combustible $\left[\frac{kg}{s} \right]$

H_u = poder calorífico inferior $\left[\frac{kJ}{kg} \right]$

Potencia de vapor de la caldera

$$P_{vap} = \dot{m}_{vap} * (h_3' - h_3) \quad [w] \quad (3)$$

Donde:

P_{vap} = potencia de vapor de la caldera [w]

\dot{m}_{vapor} = flujo másico del vapor $\left[\frac{kg}{s} \right]$

**“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA CENTRAL DE VAPOR
EXPERIMENTAL A DIFERENTES CARGAS ELÉCTRICAS CON COMBUSTIBLE GLP”**

$$h_{3'} = \text{entalpía de vapor saturado} \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

$$h_3 = \text{entalpía de líquido saturado} \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

El valor de las entalpías $h_{3'}$ y h_3 son determinados por medio de las calculadoras de Spirax Sarco con la temperatura T3 [°C].

Flujo másico del vapor

$$\dot{m}_{vap} = \rho_c * \dot{v}_c \left[\frac{kg}{s} \right] \quad (4)$$

Donde:

$$\dot{m}_{vapor} = \text{flujo másico del vapor} \left[\frac{kg}{s} \right]$$

$$\rho_c = \text{densidad del condensado (densidad del agua)} \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

$$\dot{v}_c = \text{flujo volumétrico experimental del condensado} [l/h]$$

El flujo volumétrico experimental de condensado se lo puede calcular de la siguiente manera:

$$\dot{v}_c = \frac{V_c}{\Delta t} \quad [l/h] \quad (5)$$

Donde:

$$V_c = \text{volumen del condensado} [l/h]$$

El Volumen del condensado se obtiene del depósito de medición que se encuentra bajo el tablero de experimentación

$$\Delta t = \text{tiempo de experimentación}$$

Eficiencia energética de la caldera

$$n_b \% = \frac{P_{vap}}{P_{gas}} * 100 \quad (6)$$

“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA CENTRAL DE VAPOR EXPERIMENTAL A DIFERENTES CARGAS ELÉCTRICAS CON COMBUSTIBLE GLP”

Donde:

$n_b\%$ = Eficiencia energética de la caldera [%]

P_{vap} = potencia de vapor de la caldera [w]

P_{gas} = Potencia suministrada por el combustible [w]

Potencia eléctrica continua del generador

$$P_{el} = U * I \quad [w] \quad (7)$$

Donde:

P_{el} = Potencia eléctrica continua del generador [w]

U = Voltaje o Tensión eléctrica continua del generador [v]

I = Corriente o Amperaje continuo del generador [mA]

El valor de U e I se puede observar en el voltímetro del panel de mediciones.

Eficiencia energética total del sistema

$$n\% = \frac{P_{el}}{P_{gas}} * 100 \quad (8)$$

Donde:

$n\%$ = Eficiencia total del sistema [%]

P_{el} = Potencia eléctrica continua del generador [w]

P_{gas} = Potencia suministrada por el gas combustible [w]

Para determinar la eficiencia exergética, se consideran las siguientes ecuaciones generales
(ecuaciones 9 - 13)

Exergía de un gas combustible

$$Ex_{gas} = Ex_{f\ gas} + Ex_{q\ gas} \quad \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (9)$$

**“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA CENTRAL DE VAPOR
EXPERIMENTAL A DIFERENTES CARGAS ELÉCTRICAS CON COMBUSTIBLE GLP”**

Donde:

Ex_{gas} = La exergía del gas combustible $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$

$Ex_{f\ gas}$ = La exergía física del gas combustible $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$

$Ex_{q\ gas}$ = La exergía química del gas combustible $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$.

Según (Agudelo, Bedoya, y Agudelo, 2006), la exergía se calcula como :

$$Ex_{q\ gas} = \sum_1^n x_i * Ex_i + R * T_0 * \sum_1^n x_i * \ln(x_i) \quad \left[\frac{kJ}{kg}\right] \quad (10)$$

Donde:

x_i = fracción molar de los componentes del gas GLP

E_i = exergía química de cada componente

R = Constante universal de los gases

En este estudio se considera despreciable la exergía física, porque en el instante que sale el gas de la bombona prácticamente se encuentra a la misma presión y temperatura del ambiente.

Exergía del calor

$$Ex_c = Q * \left[1 - \frac{T_0}{T_a}\right] \quad \left[\frac{kJ}{kg}\right] \quad (11)$$

Donde:

Ex_c = exergía del calor $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$

Q = Calor $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$

T_0 = Temperatura ambiente del sistema [K]o [°C]

T_a = Temperatura del flujo de calor o fuente de calor [K]o [°C]

La exergía del calor, es una medida de calor que puede ser transformable en trabajo útil, viene determinada por el rendimiento de Carnot (Fu, y otros, 2013)

**“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA CENTRAL DE VAPOR
EXPERIMENTAL A DIFERENTES CARGAS ELÉCTRICAS CON COMBUSTIBLE GLP”**

Exergía del flujo

Según Mehrpooya, Sayyad, y Zonouz (2017), cuando el flujo caloportador es el agua, la exergía de flujo se calculan de la siguiente manera:

$$Ex_{flujo} = (H - H_0) - T_0 * (S - S_0) \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (12)$$

Donde:

$$Ex_{flujo} = \text{Exergía del flujo} \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

$$H = \text{Entalpía del flujo a la entrada o salida} \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

$$H_0 = \text{Entalpía de referencia} \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

$$T_0 = \text{Temperatura de referencia} [^{\circ}\text{C}]$$

$$S = \text{Entropía del flujo a la entrada o salida} \left[\frac{kJ}{K} \right]$$

$$S_0 = \text{Entropía de referencia} \left[\frac{kJ}{K} \right]$$

Los subíndices cero, indican las propiedades a una temperatura referida (estado muerto), la exergía de flujo es la cantidad máxima de trabajo que puede llevarse a cabo en un sistema, cuando sus flujos pasan de una temperatura y presión inicial, al estado muerto (Monteiro y Torrezani, 2015)

Eficiencia exergética

$$\eta_{x \text{ sistema}}(\%) = \frac{Ex \text{ útil}}{Ex \text{ consumida}} * 100 \quad (13)$$

Donde:

$$\eta_{x \text{ sistema}}(\%) = \text{Eficiencia exergética} [\%]$$

$$Ex \text{ útil} = \text{Es la exergía o potencial de trabajo útil en un proceso} \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA CENTRAL DE VAPOR EXPERIMENTAL A DIFERENTES CARGAS ELÉCTRICAS CON COMBUSTIBLE GLP”

$Ex_{consumida}$ = Es la exergía entregada en un proceso $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$

Leal (2017) indica que la eficiencia exergética, se puede determinar con la relación del flujo de exergía útil y el de exergía consumida.

Cengel y Boles (2014) señalan que el rendimiento exergético tiene un rango de valores, es cero cuando existe destrucción total de exergía y uno cuando no hay destrucción de exergía.

Exergía Destruída (Irreversibilidad)

La destrucción de exergía se da por irreversibilidades en los sistemas, un proceso se convierte en irreversible, cuando no existe alguna manera de regresarlo y por lo tanto, se convierte en potencial de trabajo perdido (Rodriguez, 2018) . La transferencia de calor entre los fluidos de trabajo y los alrededores conduce a irreversibilidades (Mirzaei, Mojtaba, Ahmadi, Mobin, Nazari y Alayi, 2018)

Consideraciones realizadas para los cálculos

Para los cálculos exergéticos del sistema, se realizan las siguientes consideraciones:

- Sistema abierto
- La central de vapor experimental opera en estado estacionario
- Se deprecia la energía potencial y cinética entre la entrada y salida
- Se considera el punto muerto el ambiente $T_o = 18.3 \text{ }^\circ\text{C} = 291.45 \text{ K}$
- Los gases que resulten de la combustión son despreciados
- Se considera que la exergía total del GLP es igual a la exergía química liberada por combustión.

**“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA CENTRAL DE VAPOR
EXPERIMENTAL A DIFERENTES CARGAS ELÉCTRICAS CON COMBUSTIBLE GLP”**

Cálculo de la densidad del gas combustible (GLP)

La ecuación (14) calcula la densidad del GLP, para esto se obtienen datos de los anexos A y B, así como también, la densidad del aire en tablas (Cengel y Cimbala, 2014).

$$\delta_{combustible\ GLP} = \delta_{C_3H_8} * x_{C_3H_8} + \delta_{C_4H_{10}} * x_{C_4H_{10}} \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad (14)$$

Donde:

$$\delta_{combustible} = \text{densidad del GLP} \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

$$\delta_{C_3H_8} = \text{densidad del propano comercial} \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

$$x_{C_3H_8} = \% \text{ de composición del propano comercial en la mezcla de GLP}$$

$$\delta_{C_4H_{10}} = \text{densidad del butano comercial} \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

$$x_{C_4H_{10}} = \% \text{ de composición del butano comercial en la mezcla de GLP}$$

RESULTADO Y DISCUSION

Cálculo de la densidad del propano:

$$\delta_{C_3H_8} = \gamma_{C_3H_8} * \delta_{aire} \quad (15)$$

Donde:

$$\delta_{C_3H_8} = \text{densidad del propano comercial} \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

$$\gamma_{C_3H_8} = \text{peso específico del vapor de propano a } 15.56^\circ C$$

$$\delta_{aire} = \text{densidad del aire} \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

$$\delta_{C_3H_8} = (1.50) \left(1.225 \frac{kg}{m^3} \right)$$

$$\delta_{C_3H_8} = 1.84 \frac{kg}{m^3}$$

Cálculo de la densidad del butano:

$$\delta_{C_4H_{10}} = \gamma_{C_4H_{10}} * \delta_{aire} \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad (16)$$

Donde:

$$\delta_{C_4H_{10}} = \text{densidad del butano comercial} \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

$$\gamma_{C_4H_{10}} = \text{peso específico del vapor de butano a } 15.56^\circ C$$

$$\delta_{aire} = \text{densidad del aire} \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

$$\delta_{C_4H_{10}} = (2.01) \left(1.225 \frac{kg}{m^3} \right)$$

$$\delta_{C_4H_{10}} = 2.46 \frac{kg}{m^3}$$

Cálculo de la densidad del gas combustible (GLP):

Para obtener la densidad del GLP, aplicamos los resultados de las ecuaciones (15) y (16), así como también, los porcentajes de composición del gas GLP indicados en el Anexo A.

$$\delta_{combustible\ GLP} = \delta_{C_3H_8} * x_{C_3H_8} + \delta_{C_4H_{10}} * x_{C_4H_{10}}$$

“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA CENTRAL DE VAPOR EXPERIMENTAL A DIFERENTES CARGAS ELÉCTRICAS CON COMBUSTIBLE GLP”

$$\delta_{combustible\ GLP} = (1.84 \frac{kg}{m^3})(0.7) + (2.46 \frac{kg}{m^3})(0.3)$$

$$\delta_{combustible\ GLP} = 2.03 \frac{kg}{m^3}$$

Tablas con valores adquiridos en puntos de mediciones

En la figura 6, se observa un ejemplo de medición de temperatura en un punto del sistema, además, se puede ver, el panel completo con los diferentes puntos del sistema que están identificados para tomar mediciones.



Figura 6. Ejemplo de lectura de medición de temperatura

**“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA CENTRAL DE VAPOR
EXPERIMENTAL A DIFERENTES CARGAS ELÉCTRICAS CON COMBUSTIBLE GLP”**

Mediciones y cálculos en el proceso SIN CARGA ELECTRICA

Tabla 1

Valores Obtenidos en Puntos de Medición

<i>Variable</i>	<i>Unidad</i>	<i>Medición 1</i>	<i>Medición 2</i>	<i>Medición 3</i>	<i>Promedio</i>
T1	°C	18.2	18.4	18.3	18.3
T2	°C	37.8	38.3	38.2	38.1
T3	°C	142.1	142.3	142.5	142.3
T4	°C	127.1	126.5	127.7	127
T5	°C	94.4	95.1	94.0	94.5
T6	°C	57.2	61.4	60.2	60.3
T7	°C	19.0	18.8	18.9	18.9
T8	°C	30.6	31.2	32.4	31.4
P1	barG	3	3	3	3
F1	l/h	70	70	70	70
F2	l/h	85	85	85	85
U	V	10	10	10	10
I	mA	0	0	0	0
Cargas	u	0	0	0	0

Tabla 2

Mediciones Complementarias

<i>Variable</i>	<i>Unidad</i>	<i>Medición</i>
V condensado	ml	180
Δt	s	307
D	cm	6.4
H	cm	25.3
Área intercambiador	m ²	0.05

Tabla 3

Medición de temperatura superficial del condensador

<i>Variable</i>	<i>Unidad</i>	<i>Medición 1</i>	<i>Medición 2</i>	<i>Medición 3</i>	<i>Promedio</i>
Ts	°C	60	59	59	59

**“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA CENTRAL DE VAPOR
EXPERIMENTAL A DIFERENTES CARGAS ELÉCTRICAS CON COMBUSTIBLE GLP”**

Cálculos de flujos máscicos del GLP y vapor sin carga eléctrica

Flujo máscico del combustible (GLP) sin carga:

$$\dot{m}_{combustible} = \delta_{combustible} * F_2$$

$$\dot{m}_{combustible} = \left(2.03 \frac{kg}{m^3}\right) * \left(70 \frac{l}{h}\right) * \left(\frac{1 m^3}{1000 l}\right) * \left(\frac{1 h}{3600 s}\right)$$

$$\dot{m}_{combustible} = 0.1421 \frac{kg}{h} = 0.0000395 \frac{kg}{s}$$

Los datos descritos a continuación se emplean para obtener los resultados finales del proceso.

$$\delta_{H_2O} = 997 \frac{kg}{m^3} \quad @ 15^\circ C \text{ y } 1 \text{ atm}; \quad \delta_{aire} = 1.225 \frac{kg}{m^3} \quad @ 15^\circ C \text{ y } 1 \text{ atm}$$

$$h_{conv} = 15 \frac{w}{m^2 K} \quad ; \quad C_{p_{H_2O}} = 4180 \frac{kJ}{kg \cdot K} \quad @ 25^\circ C \text{ (promedio entre } T_7 \text{ y } T_8) \text{ ver anexo 5}$$

$$PC \text{ neto} = Hu_{comb} = 10830 \frac{kcal}{kg} = 45'312.720 \frac{J}{kg}$$

Flujo máscico del vapor:

$$\dot{m}_{vapor} = \frac{180 \text{ ml} * 997 \frac{kg}{m^3}}{307 \text{ s}} = 0.000584 \frac{kg}{s}$$

Valores de entalpías sin carga eléctrica

Tabla 4
Entalpías sin carga Eléctrica

<i>Variable</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidad</i>	<i>Estado</i>
h_3	598.52	$\frac{kJ}{kg}$	Líquido saturado @ $T_3 = 142.3^\circ C$
$h_{3'}$	2735.88	$\frac{kJ}{kg}$	Vapor saturado @ $T_3 = 142.3^\circ C$
h_1	2666.30	$\frac{kJ}{kg}$	Vapor saturado @ $T_5 = 94.5^\circ C$
$h_{1'}$	251.92	$\frac{kJ}{kg}$	Líquido saturado @ $T_6 = 60.3^\circ C$
h_2	78.96	$\frac{kJ}{kg}$	Líquido subsaturado @ $T_7 = 18.9^\circ C$; $Patm$
$h_{2'}$	129.97	$\frac{kJ}{kg}$	Líquido subsaturado @ $T_8 = 31.1^\circ C$; $Patm$

Fuente: Calculadoras en <https://www.spiraxsarco.com/resources-and-design-tools/steam-tables>

**“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA CENTRAL DE VAPOR
EXPERIMENTAL A DIFERENTES CARGAS ELÉCTRICAS CON COMBUSTIBLE GLP”**

Mediciones y cálculos en el proceso CON 2 CARGAS ELECTRICAS

Tabla 5

Valores Obtenidos en Puntos de Medición

<i>Variable</i>	<i>Unidad</i>	<i>Medición 1</i>	<i>Medición 2</i>	<i>Medición 3</i>	<i>Promedio</i>
T1	°C	18.2	18.4	18.3	18.6
T2	°C	37.8	38.3	38.2	39.6
T3	°C	142.1	142.3	142.5	143
T4	°C	127.1	126.5	127.7	133
T5	°C	94.4	95.1	94.0	95.1
T6	°C	57.2	61.4	60.2	60.8
T7	°C	19.0	18.8	18.9	18.8
T8	°C	26.8	31.2	33.8	30.6
P1	barG	3	3	3	3
F1	l/h	70	70	70	70
F2	l/h	85	85	85	85
U	V	8.5	8.5	8.5	8.5
I	mA	220	220	220	220
Cargas	u	2	2	2	2

Tabla 6

Mediciones Complementarias

<i>Variable</i>	<i>Unidad</i>	<i>Medición</i>
Vcondensado	ml	180
Δt	s	325
D	cm	6.4
h	cm	25.3
Área intercambiador	m ²	0.05

Tabla 7

Medición de temperatura superficial del condensador

<i>Variable</i>	<i>Unidad</i>	<i>Medición 1</i>	<i>Medición 2</i>	<i>Medición 3</i>	<i>Promedio</i>
Ts	°C	69	63	64	65.3

**“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA CENTRAL DE VAPOR
EXPERIMENTAL A DIFERENTES CARGAS ELÉCTRICAS CON COMBUSTIBLE GLP”**

Cálculos de flujos máxicos del GLP y vapor con 2 cargas eléctricas

Con el mismo procedimiento realizado en 4.2.2 y los valores correspondientes al proceso con 2 cargas eléctricas se obtienen los siguientes valores:

Flujo máxico del combustible (GLP):

$$\dot{m}_{combustible} = 0.0000395 \frac{kg}{s}$$

Flujo máxico del vapor:

$$\dot{m}_{vapor} = 0.00055218 \frac{kg}{s}$$

Valores de entalpías con 2 cargas eléctricas

Tabla 8

Entalpías con 2 Cargas Eléctricas

<i>Variable</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidad</i>	<i>Estado</i>
h_3	601.52	$\frac{kJ}{kg}$	Líquido saturado @ $T_3 = 143 \text{ }^\circ\text{C}$
$h_{3'}$	2736.77	$\frac{kJ}{kg}$	Vapor saturado @ $T_3 = 143 \text{ }^\circ\text{C}$
h_1	2667.26	$\frac{kJ}{kg}$	Vapor saturado @ $T_5 = 95.1 \text{ }^\circ\text{C}$
$h_{1'}$	254.01	$\frac{kJ}{kg}$	Líquido saturado @ $T_6 = 60.8 \text{ }^\circ\text{C}$
h_2	78.54	$\frac{kJ}{kg}$	Líquido subsaturado @ $T_7 = 18.8 \text{ }^\circ\text{C}$; $Patm$
$h_{2'}$	123.70	$\frac{kJ}{kg}$	Líquido subsaturado @ $T_8 = 29.6 \text{ }^\circ\text{C}$; $Patm$

Fuente: <https://www.spiraxsarco.com/resources-and-design-tools/steam-tables>

**“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA CENTRAL DE VAPOR
EXPERIMENTAL A DIFERENTES CARGAS ELÉCTRICAS CON COMBUSTIBLE GLP”**

Mediciones y cálculos en el proceso CON 3 CARGAS ELÉCTRICAS

Tabla 9

Valores Obtenidos en Puntos de Medición

<i>Variable</i>	<i>Unidad</i>	<i>Medición 1</i>	<i>Medición 2</i>	<i>Medición 3</i>	<i>Promedio</i>
T1	°C	19.3	19.4	19.5	19.4
T2	°C	40.8	40.9	41.0	40.9
T3	°C	143.6	144.3	144.1	144.0
T4	°C	138.9	137.6	138.3	138.3
T5	°C	96.5	96.2	96.4	96.4
T6	°C	71.3	71.4	71.4	71.4
T7	°C	18.8	18.9	18.7	18.8
T8	°C	36.8	37.5	38.5	37.6
P1	barG	3	3	3	3
F1	l/h	50	60	70	60
F2	l/h	80	80	80	80
U	V	8.7	8.7	8.7	8.7
I	mA	255	260	260	258.3
Cargas	u	3	3	3	3

Tabla 10

Mediciones Complementarias

<i>Variable</i>	<i>Unidad</i>	<i>Medición</i>
Vcondensado	ml	175
Δt	s	282
D	cm	6.4
h	cm	25.3
Área intercambiador	m ²	0.05

Tabla 11

Medición de temperatura superficial del condensador

<i>Variable</i>	<i>Unidad</i>	<i>Medición 1</i>	<i>Medición 2</i>	<i>Medición 3</i>	<i>Promedio</i>
T _s	°C	65	67	68	66.7

**“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA CENTRAL DE VAPOR
EXPERIMENTAL A DIFERENTES CARGAS ELÉCTRICAS CON COMBUSTIBLE GLP”**

Cálculos de flujos máscicos del GLP y vapor con 3 cargas eléctricas

Con el mismo procedimiento realizado en 4.2.2 y los valores correspondientes al proceso con 3 cargas eléctricas se obtienen los siguientes valores:

Flujo máscico del combustible (GLP):

$$\dot{m}_{combustible} = 0.0000451 \frac{kg}{s}$$

Flujo máscico del vapor:

$$\dot{m}_{vapor} = 0.00061871 \frac{kg}{s}$$

Valores de entalpías con 3 cargas eléctricas

Tabla 12

Entalpías con 3 Cargas Eléctricas

Variable	Valor	Unidad	Estado
h_3	605.82	$\frac{kJ}{kg}$	Líquido saturado @ $T_3 = 144.0 \text{ }^\circ\text{C}$
$h_{3'}$	2738.03	$\frac{kJ}{kg}$	Vapor saturado @ $T_3 = 144.0 \text{ }^\circ\text{C}$
h_1	2669.34	$\frac{kJ}{kg}$	Vapor saturado @ $T_5 = 96.4 \text{ }^\circ\text{C}$
$h_{1'}$	298.42	$\frac{kJ}{kg}$	Líquido saturado @ $T_6 = 71.4 \text{ }^\circ\text{C}$
h_2	78.54	$\frac{kJ}{kg}$	Líquido subsaturado @ $T_7 = 18.8 \text{ }^\circ\text{C}$; $Patm$
$h_{2'}$	146.9	$\frac{kJ}{kg}$	Líquido subsaturado @ $T_8 = 35.15 \text{ }^\circ\text{C}$; $Patm$

Fuente: <https://www.spiraxsarco.com/resources-and-design-tools/steam-tables>

“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA CENTRAL DE VAPOR EXPERIMENTAL A DIFERENTES CARGAS ELÉCTRICAS CON COMBUSTIBLE GLP”

Cálculo de la exergía del combustible GLP

Para el cálculo de la exergía del GLP, básicamente se toma datos de las exergías de compuestos con carbono e hidrógeno de acuerdo al Anexo C (Bejan, 2016) y el desarrollo del cálculo se puede ver en el Anexo D.

$$\dot{E}x_{q_{gas}} = \sum_1^n x_i * Ex_i + R * T_0 * \sum_1^n x_i * \ln(x_i)$$

$$\dot{E}x_{q_{gas}} = 49.405,80 \frac{kJ}{kg}$$

Cálculo de la exergía en puntos del sistema

Para el cálculo exergético en los diferentes puntos del sistema que están marcados y numerados en círculos del gráfico correspondiente al esquema del proceso (ver figura 7), se aplicaron las ecuaciones (10), (11), (12) y (13), además, se aplica el factor de relación másica de vapor – combustible G_v , para transformar todo lo que está en unidades de kJ/kg vapor a kJ/kg_{GLP} con la finalidad de expresar todas las exergías en las mismas unidades.

**“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA CENTRAL DE VAPOR
EXPERIMENTAL A DIFERENTES CARGAS ELÉCTRICAS CON COMBUSTIBLE GLP”**

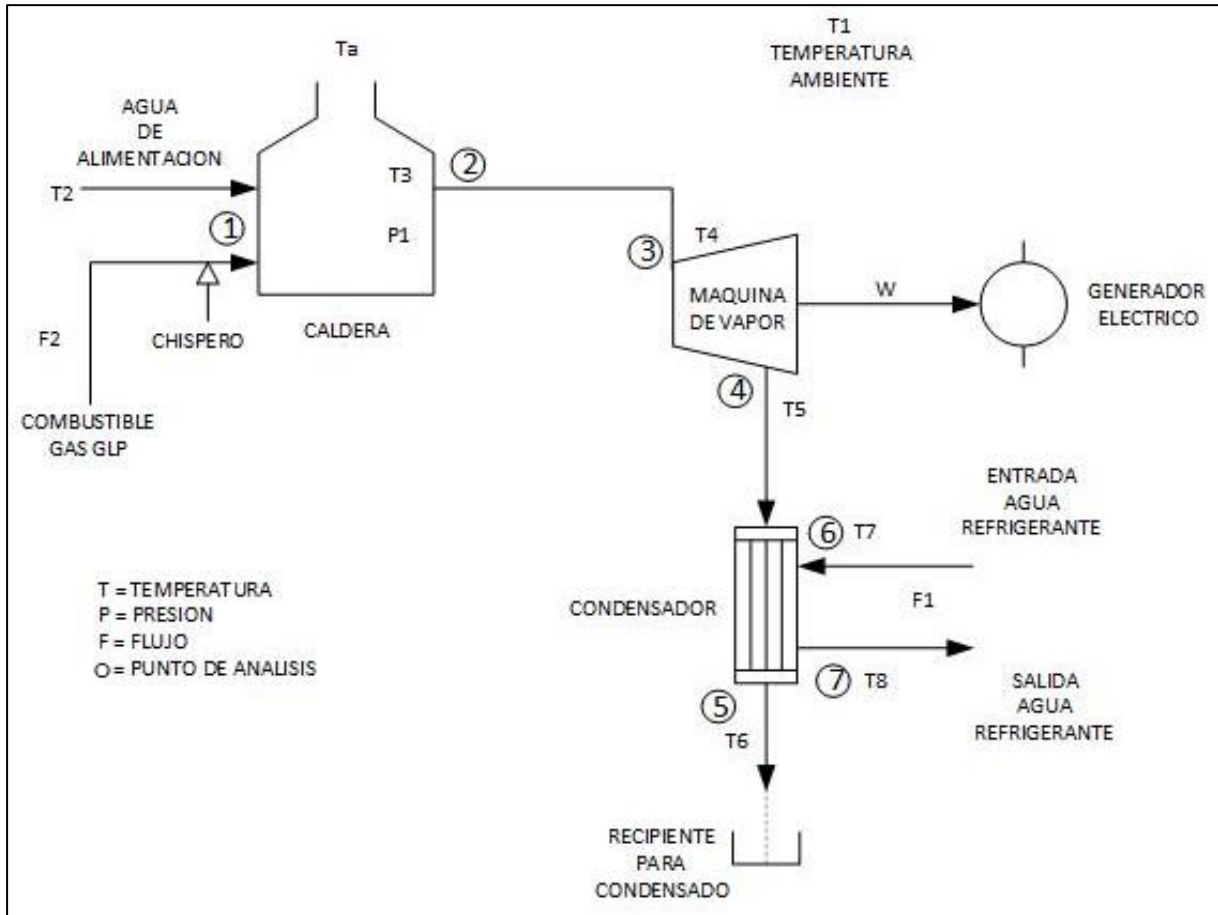


Figura 7. Puntos marcados para el cálculo de exergía

Tabla 13 :

Balance de Exergía y Eficiencia Exergética de los Componentes del Sistema

Componente	Balance de Exergía	Eficiencia Exergética
Caldera de vapor	$Ex_1 + Q_{vapor} = Ex_2 + Ex_D$	$\eta_{ex} = \frac{Q_{vapor}}{Ex_1 - Ex_2}$
Máquina de vapor	$Ex_3 = Ex_4 + W_{máq vapor} + Ex_D$	$\eta_{ex} = \frac{W_{máq vapor}}{Ex_3 - Ex_4}$
Condensador	$Ex_4 + Ex_6 + Q_{H2O fría}$ $= Ex_5 + Ex_7 + Q_{pérd cond} + Ex_D$	$\eta_{ex} = \frac{Q_{pérd cond} - Q_{H2O fría}}{Ex_1 - Ex_2}$
Generador eléctrico		$\eta_{ex} = \frac{W_{generador elect}}{W_{máq vapor}}$

**“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA CENTRAL DE VAPOR
EXPERIMENTAL A DIFERENTES CARGAS ELÉCTRICAS CON COMBUSTIBLE GLP”**

Tabla 14

Propiedades de Estado y Cálculo de Exergía en Puntos del Sistema sin Carga Eléctrica

<i>Punto</i>	<i>m</i> [kg vapor/s]	<i>T</i> [°C]	<i>P</i> [bar]	<i>h</i> [kJ/kg]	<i>s</i> [kJ/kg.K]	<i>Ex</i> [kJ/kg GLP]	<i>Ex</i> [kW]
0		18,30	1,0133				
1						52.416,9413	2,07047
2	0,00058	142,30	3,0000	2.735,8800	6,9078	16.878,0082	0,66668
3	0,00058	127,00	-	2.715,4000	7,0567	15.704,3050	0,62032
4	0,00058	94,50	-	2.666,3000	7,4214	12.849,0654	0,50754
5	0,00058	60,30	-	251,9250	0,8352	3.756,9968	0,14840
6	0,02354	18,90	1,0133	78,9886	0,2808	3.548,2198	0,14015
7	0,02354	31,10	1,0133	130,0010	0,4519	3.569,2642	0,14099

Nota: La exergía en el punto 1, es igual a la suma de la exergía del agua de alimentación más la exergía química del combustible

Tabla 15

Potencia y Calor de Componentes en el Sistema sin Carga Eléctrica

	<i>E</i> [kW]	<i>ex</i> [kJ/kg vapor]	<i>ex</i> [kJ/kg GLP]	<i>Ex</i> [kW]
W máq	0,00475	8,1258	149,3066	0,0589761
W gen	0,00000	0,0000	0,0000	0,000000
Q vapor	1,24467	-	-	-
Q vapor Carnot	0,33811	578,4047	10627,8710	0,419800
Q agua enfri	1,23441	-	-	-
Q agua enfri Carnot	0,00254	0,1077	1,9795	0,001157
Q perd cond	0,01026	-	-	-
Q perd cond Carnot	0,00043	0,7385	13,5697	0,000536

Nota: E significa energía medida en kilovatios

Tabla 16

Propiedades de Estado y Cálculo de Exergía en Puntos del Sistema con 2 Cargas Eléctricas

<i>Punto</i>	<i>m</i> [kg vapor/s]	<i>T</i> [°C]	<i>P</i> [bar]	<i>h</i> [kJ/kg]	<i>s</i> [kJ/kg.K]	<i>Ex</i> [kJ/kg GLP]	<i>Ex</i> [kW]
0		18,60	1,0133				
1						52.498,2439	2,07368
2	0,00055	144,00	3,0000	2.738,0300	6,8919	17.258,6108	0,68172
3	0,00055	138,30	-	2.730,7200	6,9455	16.829,8810	0,66478
4	0,00055	96,40	-	2.669,3400	7,3979	13.217,2249	0,52208
5	0,00055	71,40	-	298,4220	0,9723	3.945,8849	0,15586
6	0,02354	19,90	1,0133	83,1727	0,2951	3.615,4036	0,14281
7	0,02354	35,20	1,0133	147,1350	0,5079	3.650,7279	0,14420

Nota: La exergía en el punto 1, es igual a la suma de la exergía del agua de alimentación más la exergía química del combustible

**“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA CENTRAL DE VAPOR
EXPERIMENTAL A DIFERENTES CARGAS ELÉCTRICAS CON COMBUSTIBLE GLP”**

Tabla 17

Potencia y Calor de Componentes en el Sistema con 2 Cargas Eléctricas

	<i>E</i> [kW]	<i>ex</i> [kJ/kg vapor]	<i>ex</i> [kJ/kg GLP]	<i>Ex</i> [kW]
W máq	0,00469	8,4936	158,6846	0,006268
W gen	0,00187	3,3866	63,2708	0,002499
Q vapor	1,17905	-	-	-
Q vapor Carnot	0,34301	621,1960	1.1605,6995	0,458425
Q agua enfri	1,16258	-	-	-
Q agua enfri Carnot	0,00516	0,2191	4,0932	0,002260
Q perd cond	0,01178	-	-	-
Q perd cond Carnot	0,00063	1,1487	21,4617	0,000847

Nota: E significa energía medida en kilovatios

Tabla 18

Propiedades de Estado y Cálculo de Exergía en Puntos del Sistema con 3 Cargas Eléctricas

<i>Punto</i>	<i>m</i> [kg vapor/s]	<i>T</i> [°C]	<i>P</i> [bar]	<i>h</i> [kJ/kg]	<i>s</i> [kJ/kg.K]	<i>Ex</i> [kJ/kg GLP]	<i>Ex</i> [kW]
0		18,30	1,0133				
1						52.546,0727	2,37041
2	0,000618	144,00	3,0000	2.738,0300	6,8919	17.326,3269	0,78161
3	0,000618	138,30	-	2.730,7200	6,9455	16.839,1598	0,76207
4	0,000618	96,40	-	2.669,3400	7,3979	13.243,1021	0,59741
5	0,000618	71,40	-	298,4220	0,9723	3.990,1281	0,18000
6	0,016620	19,90	1,0133	83,1727	0,2951	3.667,0558	0,16542
7	0,016620	35,20	1,0133	147,1350	0,5079	3.699,4723	0,16689

Nota: La exergía en el punto 1, es igual a la suma de la exergía del agua de alimentación más la exergía química del combustible

**“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA CENTRAL DE VAPOR
EXPERIMENTAL A DIFERENTES CARGAS ELÉCTRICAS CON COMBUSTIBLE GLP”**

Tabla 19

Potencia y Calor de Componentes en el Sistema con 3 Cargas Eléctricas

	<i>E</i> [kW]	<i>ex</i> [kJ/kg vapor]	<i>ex</i> [kJ/kg GLP]	<i>Ex</i> [kW]
W máq	0,00634	10,2473	193,0691	0,008709
W gen	0,00225	3,6367	68,5182	0,003090
Q vapor	1,31426	-	-	-
Q vapor Carnot	0,37979	613,8552	11.565,6397	0,521737
Q agua enfri	1,30233	-	-	-
Q agua enfri Carnot	0,00222	0,1337	2,5190	0,000113
Q perd cond	0,01193	-	-	-
Q perd cond Carnot	0,00061	0,9880	18,6150	0,000839

Nota: E significa energía medida en kilovatios

Para evaluar tanto la eficiencia energética, así como, la eficiencia exergética de la central en estudio, todas las mediciones se realizaron en el laboratorio.

Resultado Energético y Exergético sin carga eléctrica

Tabla 20

Resultado Energético sin Carga Eléctrica

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidad</i>
Consumo de combustible	0.0000395	kg/s
Potencia suministrada por el combustible	1.788,59	w
Flujo másico del vapor utilizado	0,0005845	kg/s
Potencia de vapor de la caldera	1.249,42	w
Eficiencia de la caldera	69.85	%
Flujo másico del agua fría	0,02354	kg/s
Calor del agua	1.234,41	w
Calor de pérdidas en condensador	10,26	w
Calor del vapor	1.244,67	w
Potencia de la máquina (máquina de vapor)	4,75	w
Potencia eléctrica	0.00	w
Rendimiento del generador	0.00	%
Rendimiento del sistema	0.00	%
Flujo másico experimental	0.0005	kg/s

**“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA CENTRAL DE VAPOR
EXPERIMENTAL A DIFERENTES CARGAS ELÉCTRICAS CON COMBUSTIBLE GLP”**

Tabla 21

Resultado Exergético sin Carga Eléctrica

Componente	$\eta_{ex}(\%)$	$Ex_D [kW]$
Caldera de Vapor	29,90	1,8236
Máquina de Vapor	5,22	0,1069
Condensador	0,14	0,3578
Generador eléctrico	-	-
Sistema	0,28	-

Resultado Energético y Exergético con 2 Cargas Eléctricas

Tabla 22

Resultado Energético con 2 Cargas Eléctricas

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidad</i>
Consumo de combustible	0,0000395	kg/s
Potencia suministrada por el combustible	1.788,59	w
Flujo másico del vapor utilizado	0,00055218	kg/s
Potencia de vapor de la caldera	1.179,05	w
Eficiencia de la caldera	65,92	%
Flujo másico del agua fría	0,02354	kg/s
Calor del agua	1.162,58	w
Calor de pérdidas en condensador	11,78	w
Calor del vapor	1.174,36	w
Potencia de la máquina (Máquina de vapor)	4,69	w
Potencia eléctrica	1,87	w
Rendimiento del generador	39,88	%
Rendimiento del sistema	0,10	%
Flujo másico experimental	0.00045	kg/s
Eficiencia de la caldera con parámetros de fábrica	43,05	%

Tabla 23

Resultado Exergético con 2 Cargas Eléctricas

Componente	$\eta_{ex}(\%)$	$Ex_D [kW]$
Caldera de vapor	32,93	1,8504
Máquina de vapor	4,39	0,1364
Condensador	0,23	0,3658
Generador eléctrico	1,37	-
Sistema	0,30	-

**“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA CENTRAL DE VAPOR
EXPERIMENTAL A DIFERENTES CARGAS ELÉCTRICAS CON COMBUSTIBLE GLP”**

Resultado Energético y exergético con 3 Cargas Eléctricas

Tabla 24

Resultado Energético con 3 Cargas Eléctricas

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidad</i>
Consumo de combustible	0,000045	kg/s
Potencia suministrada por el combustible	2.044,10	w
Flujo másico del vapor utilizado	0,0006187	kg/s
Potencia de vapor de la caldera	1.319,21	w
Eficiencia de la caldera	64,53	%
Flujo másico del agua fría	0,01662	kg/s
Calor del agua	1.302,33	w
Calor de pérdidas en condensador	11,92	w
Calor del vapor	1.314,26	w
Potencia de la máquina (Máquina de vapor)	4,95	w
Potencia eléctrica	2,25	w
Rendimiento del generador	45,40	%
Rendimiento del sistema	0,11	%
Flujo másico experimental	0,00048	kg/s

Tabla 25

Resultado Exergético con 3 Cargas Eléctricas

<i>Componente</i>	<i>$\eta_{ex}(\%)$</i>	<i>$Ex_D [kW]$</i>
Caldera de Vapor	32,83	2,11
Máquina de Vapor	5,28	0,15
Condensador	0,20	0,41
Generador eléctrico	1,44	
Sistema	0,36	

Para la discusión se utiliza los resultados de eficiencia energética y exergética total del sistema y la caldera.

“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA CENTRAL DE VAPOR EXPERIMENTAL A DIFERENTES CARGAS ELÉCTRICAS CON COMBUSTIBLE GLP”

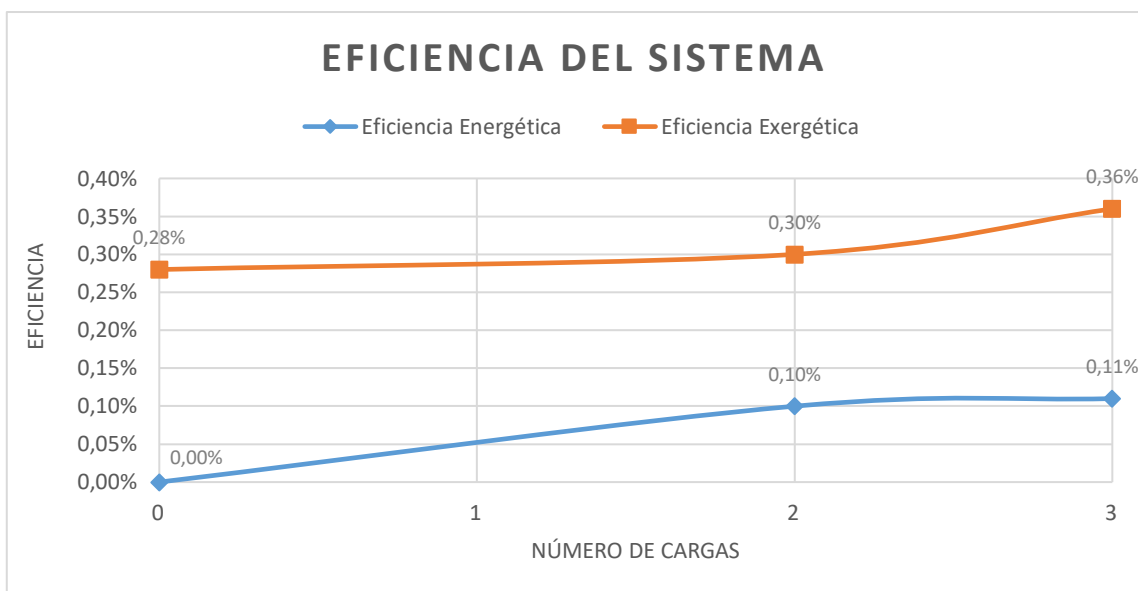


Figura 8. Resultado consolidado de la eficiencia energética y eficiencia exergética del sistema

En la figura 8 se puede ver el resultado de la eficiencia energética del sistema a diferentes cargas eléctricas, sin carga eléctrica (0 cargas) es de 0%, lo cual tiene sentido ya que el generador eléctrico no entrega carga. La eficiencia energética al conectar 2 cargas eléctricas tiene un valor del 0,10 % y al conectar 3 cargas eléctricas da un valor de 0,11%, mencionados valores son muy bajos, esto indica que se trata de un sistema muy ineficiente, cabe recalcar que estos cálculos se dan con el uso de combustible GLP.

Eficiencia total

La eficiencia total se calcula en base a la relación entre la potencia eléctrica y la potencia de suministro.

$$\eta = \frac{P_{el}}{P_{gas}} = \frac{1,5 \text{ W}}{1187 \text{ W}} \quad (5.13)$$
$$\eta = 0,0013 = 0,13 \%$$

Figura 9. Cálculo del valor de la Eficiencia Energética de la central de vapor ET - 810

“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA CENTRAL DE VAPOR EXPERIMENTAL A DIFERENTES CARGAS ELÉCTRICAS CON COMBUSTIBLE GLP”

En la figura 9, se tiene el valor de la eficiencia energética del 0,13% que se indica en el manual de la central de vapor ET - 810, la información es que está medido con 2 cargas eléctricas y utilizando gas Propano (C_3H_8) a $25,15^\circ C$ y presión de 50 mbar, (G.U.N.T. , 2015), y 0,10% con gas GLP a $18,6^\circ C$ y presión de 3 bar, los valores difieren ya que los flujos máxicos indicado en el manual y el experimental son diferentes, así como, el volumen de condensado y tiempo de experimentación, ejemplo de flujos máxicos; 0,000258 kg/s (ver manual) y 0,0000395 kg/s (ver tabla 22), que contribuyen en la determinación de la eficiencia energética. Para 3 cargas eléctricas se tiene un rendimiento energético de 0,11% con gas GLP a $19,4^\circ C$ y presión de 3 bar, lo cual nos da la idea de que tiene tendencia la eficiencia energética a mantenerse en rangos alrededor del 0,10% de acuerdo a la figura 8.

Se puede ver en la figura 8, que el valor de la eficiencia exergética del sistema le triplica a la eficiencia energética en cada experimento, esto es, para 0 cargas el valor de la eficiencia energética es de 0% y la eficiencia exergética 0,28 %, para 2 cargas eléctricas el valor de la eficiencia energética es de 0,10 % y la eficiencia exergética de 0,30 %, por último, para 3 cargas eléctricas, el valor de la eficiencia energética es de 0,11 % y la eficiencia exergética del 0,36 %. Esta comparación indica que existe exergía destruyéndose debido a que el sistema es ineficiente. Además, si el rendimiento exergético es mayor al rendimiento energético, entonces, existe una posibilidad exergética para mejorar.

**“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA CENTRAL DE VAPOR
EXPERIMENTAL A DIFERENTES CARGAS ELÉCTRICAS CON COMBUSTIBLE GLP”**

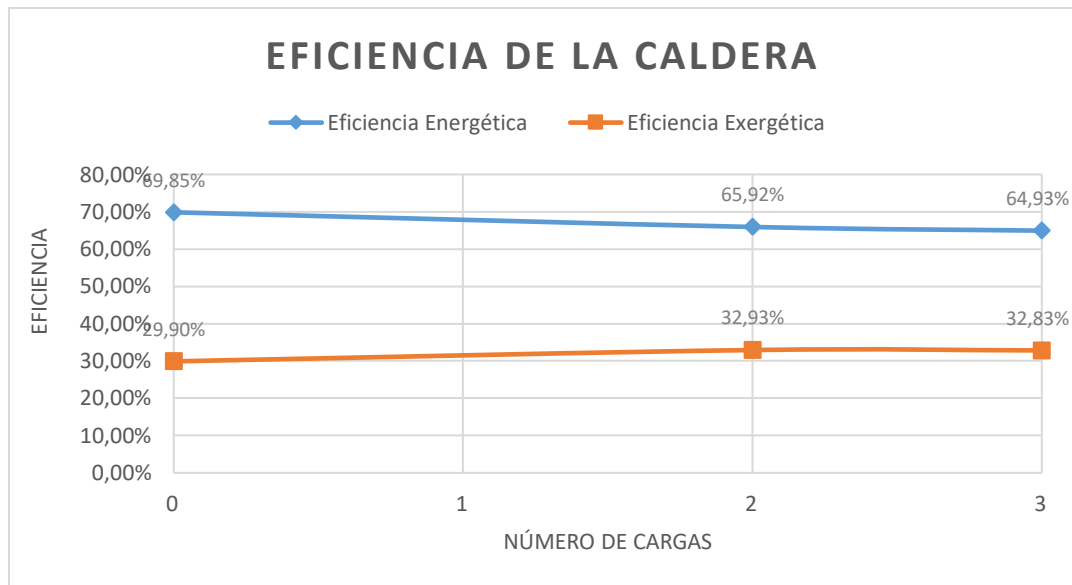


Figura 10. Resultado consolidado de la eficiencia energética y eficiencia exergética de la caldera

En cuanto a la caldera, se puede observar en la figura 10 que la eficiencia energética con 0 cargas, esto es, sin carga eléctrica es de 69,85%, la eficiencia energética al conectar 2 cargas eléctricas tiene un valor del 65.92% y al conectar 3 cargas eléctricas da un valor de 64,93%, mencionados valores indican que en cualquier caso la caldera trabaja de manera aceptable.

Eficiencia de la caldera

La eficiencia de la caldera se calcula en base a la relación entre la potencia de vapor y la potencia del combustible

$$\eta_b = \frac{P_{st}}{P_{gas}} = \frac{549 \text{ W}}{1187 \text{ W}} = 0,46 \quad (5.6)$$

Figura 11. Cálculo del valor de la Eficiencia Energética de la caldera en central de vapor ET - 810

En la figura 11, se tiene el valor de la eficiencia energética de la caldera del 46 % que se indica en el manual de la central de vapor ET - 810, con 2 cargas eléctricas. Con respecto al valor experimental del 65.92%, se debe a que los valores de los parámetros de flujo másico del gas, volumen de condensado y tiempo de medición utilizados en fábrica, son diferentes a los de este análisis.

“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA CENTRAL DE VAPOR EXPERIMENTAL A DIFERENTES CARGAS ELÉCTRICAS CON COMBUSTIBLE GLP”

Se puede ver en la figura 10, que la eficiencia energética de la caldera en porcentaje es prácticamente 2 veces la eficiencia exergética para cada experimento, esto es, para 0 cargas el valor de la eficiencia energética es de 69,85 % y la eficiencia exergética 29,90 %, para 2 cargas eléctricas el valor de la eficiencia energética es de 65,92 % y la eficiencia exergética de 32,93 %, por último, para 3 cargas eléctricas, el valor de la eficiencia energética es de 64,93 % y la eficiencia exergética del 32,83 %. El valor de la eficiencia térmica en la caldera de 65,92% en comparación con el del manual de 46 %, difiere porque dependen de los valores del flujo másico del vapor, de las entalpías en diferente estado y a diferentes temperaturas. También, se puede determinar que la eficiencia energética es mayor a la eficiencia exergética a diferentes cargas, lo cual resta posibilidades de mejoramiento exergético en la caldera.

Un estudio que se acerca a lo elaborado en esta evaluación, se dio en la Universidad Nacional del Santa - Perú, donde, se realizó un análisis sobre un caldero pirotubular construido de 6 BHP con fines académicos en la Facultad de Ingeniería en Energía, el resultado de eficiencia energética que obtuvieron es de 72,8% (Pinedo y Ruiz, 2017), este valor se puede decir que es compatible con los adquiridos de 69,85%, 65,92% y 64,93% que corresponden al caldero de este estudio.

En un estudio realizado a una planta azucarera en Sao Paulo - Brasil, el valor de la eficiencia energética del sistema es del 67 % en donde se indica que se utilizó como combustible gas natural (LLerena, 2018).

“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA CENTRAL DE VAPOR EXPERIMENTAL A DIFERENTES CARGAS ELÉCTRICAS CON COMBUSTIBLE GLP”

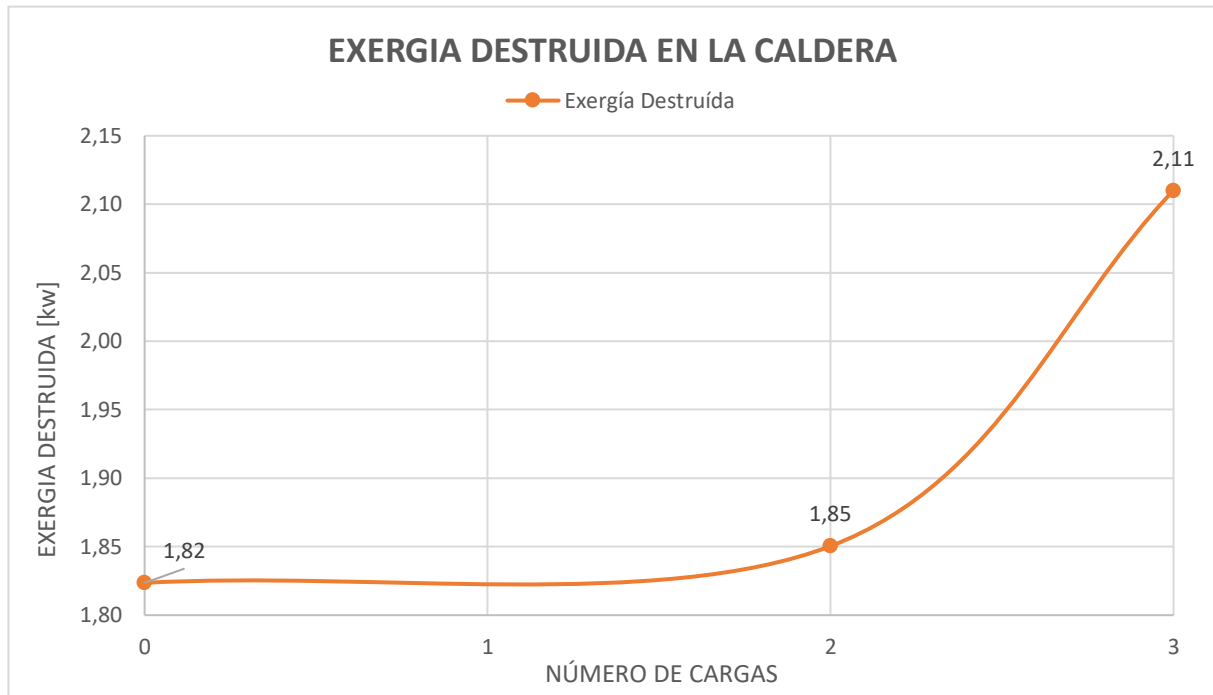


Figura 12. Resultado consolidado de la Exergía Destruída y el Número de Cargas Eléctricas

Analizando la figura 12, se puede ver que la mayor destrucción de exergía en la caldera se produce cuando se incrementa la carga eléctrica, en este caso es destrucción de exergía con un valor de 2,11 kW al utilizar 3 cargas eléctricas.

“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA CENTRAL DE VAPOR EXPERIMENTAL A DIFERENTES CARGAS ELÉCTRICAS CON COMBUSTIBLE GLP”

CONCLUSIONES

Después de efectuar la evaluación energética y exergética de la central de vapor experimental ET-810, con utilización de gas GLP comercializado en Ecuador y bajo diferentes números de cargas eléctricas, se adquiere las siguientes conclusiones:

1. En este trabajo se realizó la evaluación de la eficiencia energética y eficiencia exergética bajo el consumo de gas GLP, basados en la primera y segunda ley de la termodinámica. Para la aplicación de la metodología se debe determinar la densidad del combustible, el caudal másico del combustible y el caudal másico del vapor, que son parámetros importantes para el cálculo de las eficiencias.
2. La evaluación energética de la central térmica experimental refleja una eficiencia energética del sistema de 0 % para 0 cargas eléctricas, 0,10 % para 2 cargas eléctricas y 0,11 % para 3 cargas eléctricas. Se determinó para la eficiencia exergética el 0,28 % para 0 cargas, 0,30 % para 2 cargas y 0,36 % para 3 cargas. Comparando, se concluye que la eficiencia exergética tiene un valor mayor a la eficiencia energética en cada caso, por lo que, se podría aprovechar la exergía en destrucción y, por tanto, se tendría la oportunidad de mejorar el rendimiento del sistema.
3. La metodología aplicada en esta evaluación, determinó que el valor de eficiencia energética del sistema es del 0,10 % con 2 cargas eléctricas y al comparar con el dato del fabricante que es del 0,13% con 2 cargas eléctricas, se puede concluir que son valores muy aproximados, estos valores indican que el sistema es muy ineficiente y que comparados con valores de la eficiencia energética de sistemas de vapor reales no tienen punto de comparación, debido a que esos valores oscilan alrededor del 80-90 % puesto que se preocupan de tener mejor combustión del combustible, dan un buen tratamiento

“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA CENTRAL DE VAPOR EXPERIMENTAL A DIFERENTES CARGAS ELÉCTRICAS CON COMBUSTIBLE GLP”

cumpliendo normas en la dureza del agua de alimentación, aislamiento de tuberías, calibración de equipos, revisión de fugas, etc.

4. Para la evaluación de la eficiencia energética de la caldera, el método aplicado presenta el valor del 65,92%, en cambio el dato del fabricante indica un valor del 46%, entonces, se realizó un análisis debido a la diferencia en valores, concluyendo que el flujo másico del combustible \dot{m}_{gas} , el volumen del condensado recogido $V_{condensado}$ y el tiempo de medición Δt , son determinantes en el cálculo de la eficiencia de la caldera, por lo que se realizó un recálculo, reemplazando el valor del flujo másico experimental de 85 l/h por 50 l/h valor de fábrica, el volumen de condensado experimental de 180 ml por 155 ml valor de fábrica, así como también, el tiempo experimental de medición de 5 minutos por el tiempo de fábrica de 10 minutos, obteniendo una eficiencia energética de la caldera del 43,05%. Concluyendo así, que con la metodología aplicada los valores son muy aproximados ya que el valor obtenido está aproximado al de fábrica que es 46%, tomando en cuenta que el gas utilizado en fábrica es Propano y en nuestro caso de análisis GLP.
5. Se recomienda realizar un estudio con la utilización de gas natural, encendiendo de 1 a 4 cargas eléctricas con tiempos de medición en intervalos de 10 minutos, con la finalidad de comparar con los parámetros y datos indicados por el fabricante.

**“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA CENTRAL DE VAPOR
EXPERIMENTAL A DIFERENTES CARGAS ELÉCTRICAS CON COMBUSTIBLE GLP”**

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agudelo, A., Bedoya, I., y Agudelo, J. (2006). «Análisis exergético de un motor de automoción operando con gas natural efecto de la configuración del kit de conversión y del sistema de encendido». *Revista Facultad de Ingenieria Universidad de Antioquia* unknown(38):40-52.
- Bejan, Adrian. (2016). *Advanced_engineering_thermodynamics*. Fourth. New Jersey.
- Cengel, Y., y Boles, M. (2014). *TERMODINÁMICA 8va EDICION*. Vol. 1. 8va ed. editado por T. M.-H. Companies. México.
- Cengel, Y., y Cimbala, J. (2014). «Cálculos de la DFC turbulenta». *Mecánica De Fluidos* 1:876-79.
- Fu, J., Liu, J., Feng, R., Yang, Y. , Wang, L., y Wang, Y. (2013). «Energy and exergy analysis on gasoline engine based on mapping characteristics experiment». *Applied Energy* 102:622-30. doi: 10.1016/j.apenergy.2012.08.013.
- G.U..N.T. Geratebau GmbH. (2018). «ET 810 Central térmica de vapor con máquina de vapor». 1(40):1-2.
- G.U.N.T. (2015). *Manual de Experimentos Central de Vapor con Máquina de Vapor GUNT*. Geratebau, Alemania.
- Gómez, D., y Riesco, J. (2016). «Análisis exergético de planta piloto de vapor para generación de energía eléctrica». *Jóvenes en la ciencia* 2(1):1843-49. doi: 10.13140/RG.2.2.23112.78084.
- González, R. (2015). «Generadores de Vapor» editado por E. Feijó. 489.
- Güiza, R., y Rangel, V. (2017). «Metodología para determinar la eficiencia energetica de calderas de baja potencia». (1):2628-34.
- Hincapié, D. (2015). «Deficini3n de una metodolog3a de diagn3stico en eficiencia energética

“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA CENTRAL DE VAPOR EXPERIMENTAL A DIFERENTES CARGAS ELÉCTRICAS CON COMBUSTIBLE GLP”

aplicable a calderas convencionales de vapor». Universidad Pontífica Bolivariana.

International Energy Agency. (2018). «Energy efficiency 2018 Analysis and outlooks 2040».

IEA, 174.

Jiménez, R., Madrigal, J., Lápido, M., y Vidal, D. (2016). «Método para la evaluación de la eficiencia e impacto ambiental de un generador de vapor». *Ingeniería Energética*. ISSN 1815-5901.

Kallert, A., Schmidt, D., y Bläse, T. (2017). «Exergy-based analysis of renewable multi-generation units for small scale low temperature district heating supply». *Energy Procedia* 116:13-25. doi: 10.1016/j.egypro.2017.05.051.

Leal, D. (2017). «Aplicación del análisis exergético a una instalación de producción de hidrocarburos de Ecopetrol S.A.» Universidad Libre - Colombia.

Llanes, E., Carguachi, J., y Rocha, J. (2018). «Evaluación energética y exergética en un motor de combustión interna ciclo Otto de 1.6L». *Enfoque UTE* 9(4):221-32. doi: 10.29019/enfoqueute.v9n4.365.

LLerena, O. (2018). «Análisis energético, exergético y económico de un sistema de cogeneración: Caso para una planta azucarera de San Pablo». *Ingenius* (19):29-39. doi: 10.17163/ings.n19.2018.03.

López, G., García, E., y Convertini, L. (2017). «Eficiencia Energética Mediante La Aplicación De Balance Energético Y Exergético: Estudio De Una Central Termoeléctrica (Con El Uso De Datos Reales Y Resultados Que Dan Mejoras Aplicables a La Misma Para Mejorar Su Eficiencia)».

Manzuera, H., Rojas, B., y Castang, C. (2014). *Uso de los análisis de exergía y transferencia de calor para identificar ahorros potenciales de energía en calderas pirotubulares*.

Mehrpooya, M., Sayyad, S., y Zonouz, M. (2017). «Energy, exergy and sensitivity analyses of

“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA CENTRAL DE VAPOR EXPERIMENTAL A DIFERENTES CARGAS ELÉCTRICAS CON COMBUSTIBLE GLP”

- a hybrid combined cooling, heating and power (CCHP) plant with molten carbonate fuel cell (MCFC) and Stirling engine». *Journal of Cleaner Production* 148:283-94. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.01.157.
- Miranda, R.(2018). «Calderas: Clasificación, Usos Y Mecanismos De Transferencia De Calor». *Researchgate* (Researchgate):8.
- Mirzaei, M., Ahmadi, M., Mobin, M., Nazari, M., y Alayi, Reza. (2018). «Energy, exergy and economics analysis of an ORC working with several fluids and utilizes smelting furnace gases as heat source». *Thermal Science and Engineering Progress* 5(September 2017):230-37. doi: 10.1016/j.tsep.2017.11.011.
- Monteiro, A., y Torrezani, M. (2015). «Balanço Energético e Exergético de uma Pequena Central Termelétrica equipada com um Motor de Combustão Interna a Diesel Balanço Energético e Exergético de uma Pequena Central Termelétrica equipada com um Motor de Combustão Interna a Diesel». Universidad Federal do Espirito Santo.
- Palacios, J., Peña, A., y Hidalgo, V. (2015). «Técnicas de Gestión Energética en Sistemas de Vapor». *Revista Politécnica* 35(3):8.
- Peláez, S., y Espinoza, J. (2015). *Energías Renovables en el Ecuador*. Vol. 7. Primera. Cuenca: Gráficas Hernandez.
- Pinedo, E., y Ruiz, E. (2017). «Análisis del diseño, construcción y evaluación de un caldero pirotubular con fines académicos en la Escuela Académica Profesional de Ingeniería en Energía». Universidad Nacional del Santa, Chimbote - Perú.
- Rodriguez, J. (2018). «Evaluación del rendimiento exergético de la torre de enfriamiento del laboratorio de ingeniería química». Universidad de Carabobo.
- Turbine Technologies Ltd. (2013). «Understanding Power Production». 1-44.

**“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA CENTRAL DE VAPOR
EXPERIMENTAL A DIFERENTES CARGAS ELÉCTRICAS CON COMBUSTIBLE GLP”**


Velázquez, A., Pérez, L., y Corrales, J. (2020). «Evaluación termoexergética de un generador de vapor pirotubular compacto». *Ingeniería Investigación y Tecnología (Marzo 2020)*: <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2020.21n2.015>. ISSN 2594-0732 FI-UNAM.


**“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA CENTRAL DE VAPOR
EXPERIMENTAL A DIFERENTES CARGAS ELÉCTRICAS CON COMBUSTIBLE GLP”**

ANEXOS

Anexo A.

Hoja de Seguridad del gas licuado de petróleo suministrado por LOJAGAS

	HOJA DE SEGURIDAD DEL GAS LICUADO DE PETROLEO	Código:	G-99
		Versión:	02
		Documento Referencial:	N/A

1. IDENTIFICACIÓN DEL MATERIAL Y DEL PROVEEDOR		MSDS * No.	1
	NOMBRE COMERCIAL: GAS LICUADO COMERCIAL	TELÉFONOS DE EMERGENCIA	
	NOMBRE QUÍMICO: MEZCLA PROPANO-BUTANO	072 614 614	LOJAGAS (Loja)
	SINÓNIMOS: GLP, LPG, GAS LICUADO DE PETRÓLEO	072 677319 072 676039	LOJAGAS (Catamayo)
	USO RECOMENDADO DEL PRODUCTO QUÍMICO Y RESTRICCIONES DE USO: USO PARA EQUIPOS DE COMBUSTIÓN ADECUADOS PARA GLP	911	ECU
	NOMBRE PROVEEDOR: EMPRESA ESTATAL DE PETROLEOS DEL ECUADOR		
	DIRECCIÓN PROVEEDOR: TERMINAL EL CHORRILLO, GUAYAS		
	TELÉFONOS PROVEEDOR: GUAYAQUIL 042-870 555		
	FÓRMULA QUÍMICA: C3H8 + C4H10		
	NÚMERO CAS*: 68476-85-7		
	NÚMERO DE IDENTIFICACIÓN SGA: 1075		

2. COMPOSICIÓN E INFORMACIÓN DE LOS INGREDIENTES PELIGROSOS				
SUSTANCIA	%	NUM. SGA	LÍMITES DE EXPOSICIÓN OCUPACIONAL	
			TLV	TLV-TWA (ACGIH)
PROPANO	70	1075	2500 ppm	2500 ppm
BUTANO	30	1075	800 ppm	800 ppm

TLV: (THRESHOLD LIMIT VALUES): Valor Umbral límite
TLV-TWA: (Tire Weighted Average): Valor límite promedio ponderado en el tiempo

9. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS			
Aspecto: Gas Licuado	Color: Incoloro	pH: No pertinente	Olor: Característico, reforzado por derivados sulfurados (Mercaptano).
Punto de ebullición: (-42.1 °C) - (-3.7°C)	Punto de fusión/congelación: No pertinente		
Punto de inflamación: (-107.5 °C) - (-101.6 °C)	Autoinflamabilidad: >400 °C		
Propiedades explosivas. Lim. inferior explosivo: 1.87 - 2.02% Lim. Superior explosivo: 9.38 - 10.05%	Propiedades comburentes: No pertinente		
Presión de vapor: 10 - Kg/cm2 a 37.8°C	Densidad: 0.535 g/cm3 min. A 15°C (ASTM 1657)		
Tensión superficial: 16 dinas /cm a -47°C	Coef. Reparto (n-octanol/agua): log Kow: 2.36		
Densidad de vapor: 1.5 (aire: 1) a 0°C	Solubilidad: (a 100°C) 10.5 - 11.5 cSt (ASTM D-445)		
Hidrosolubilidad: 0.0047% vol./vol.			
Otros datos: - Azufre total: 150 ppm máx. - Poder calorífico Neto: 10830 Kcal/Kg. - Olefinas totales: 58% (ASTM D2163) - Residuo volátil (T evaporación 95% vol.): 2.2 °C máx.			

**“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA CENTRAL DE VAPOR
EXPERIMENTAL A DIFERENTES CARGAS ELÉCTRICAS CON COMBUSTIBLE GLP”**

Anexo B.

Propiedades aproximadas del GLP

Propiedades aproximadas del GLP (unidades métricas)

	Propano Comercial	Butano Comercial
Presión de vapor en kPa (presión absoluta) a:		
20°C	1.000	220
40°C	1.570	360
45°C	1.760	385
55°C	2.170	580
Peso específico	0,504	0,582
Punto de ebullición inicial a 1,00 atm de presión, °C	- 42	- 9
Peso por metro cúbico de líquido a 15,56°C, kg	504	582
Calor específico del líquido, kilojoules por kilogramo, a 15,56°C	1,464	1,276
Metros cúbicos de vapor por litro de líquido a 15,56°C	0,271	0,235
Metros cúbicos de vapor por kilogramo de líquido a 15,56°C	0,539	0,410
Peso específico del vapor (aire = 1) a 15,56°C	1,50	2,01
Temperatura de ignición en aire, °C	493-549	482-538
Temperatura máxima de llama en aire, °C	1.980	2.008
Límites de inflamabilidad en aire, % de vapor en la mezcla aire-gas:		
Inferior	2,15	1,55
Superior	9,60	8,60
Calor latente de vaporización en el punto de ebullición:		
Kilojoules por kilogramo	428	388
Kilojoules por litro	216	226
Cantidad de calor total luego de la vaporización:		
Kilojoules por metro cúbico	92.430	121.280
Kilojoules por kilogramo	49.920	49.140
Kilojoules por litro	25.140	28.100

Fuente: Código del Gas Licuado de Petróleo. NFPA 58 – Edición 2004.

“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA CENTRAL DE VAPOR
EXPERIMENTAL A DIFERENTES CARGAS ELÉCTRICAS CON COMBUSTIBLE GLP”

Anexo C.

Exergía química de combustibles

THE CHEMICAL EXERGY OF FUELS

**Lower Heating Values (LHV), Higher Heating Values (HHV), Gibbs
Free-Energy Decrease ($-\Delta G$), and Chemical Exergy (\bar{E}_{ch}) of Various Fuels at $T_0 = 25^\circ\text{C}$
and $P_0 = 1\text{ atm}$**

Fuel (Phase) ^a	LHV (kJ/mol)	HHV (kJ/mol)	$-\Delta G(T_0, P_0)$ (kJ/mol)	\bar{E}_{ch} (kJ/mol)
Hydrogen (g), H ₂	241.8	285.9	237.2	235.2
Carbon (s), C	393.5	393.5	394.4	410.5
<i>Paraffin Family, C_nH_{2n+2}</i>				
Methane (g), CH ₄	802.3	890.4	818	830.2
Ethane (g), C ₂ H ₆	1427.9	1559.9	1467.5	1493.9
Propane (g), C ₃ H ₈	2044	2220	2108.4	2149
Butane (g), C ₄ H ₁₀	2658.5	2878.5	2747.8	2802.5
Pentane (g), C ₅ H ₁₂	3272.1	3536.1	3386.9	3455.8
Pentane (l), C ₅ H ₁₂	3245.5	3509.5	3385.8	3454.8
Hexane (g), C ₆ H ₁₄	3886.7	4194.8	4026.8	4110
Hexane (l), C ₆ H ₁₄	3855.1	4163.1	4022.8	4106
Heptane (g), C ₇ H ₁₆	4501.4	4853.5	4667	4764.3
Heptane (l), C ₇ H ₁₆	4464.9	4816.9	4660	4757.3
Octane (g), C ₈ H ₁₈	5116.2	5512.2	5307.1	5418.6
Octane (l), C ₈ H ₁₈	5074.6	5470.7	5297.2	5408.7
<i>Olefin Family, C_nH_{2n}</i>				
Ethylene (g), C ₂ H ₄	1323	14.11	1331.3	1359.6
Propylene (g), C ₃ H ₆	1926.5	2058.5	1957.3	1999.9
Butene (g), C ₄ H ₈	2542.6	2718.6	2598.3	2655.1
Pentene (g), C ₅ H ₁₀	3155.8	3375.9	3236.5	3307.4
<i>Naphthene Family, C_nH_{2n}</i>				
Cyclopentane (g), C ₅ H ₁₀	3099.5	3319.5	3196.5	3267.4
Cyclopentane (l), C ₅ H ₁₀	3053.6	3273.6	3189.6	3260.5
Cyclohexane (g), C ₆ H ₁₂	3688.9	3953	3821.2	3906.3
Cyclohexane (l), C ₆ H ₁₂	3655.9	3919.9	3816.2	3901.3
<i>Aromatic Family, C_nH_{2n-6}</i>				
Benzene (g), C ₆ H ₆	3169.5	3301.6	3207.5	3298.5
Toluene (g), C ₇ H ₈	3772	3948	3831.7	3936.9
Toluene (l), C ₇ H ₈	3771	3947	3834	3939.2
Ethylbenzene (g), C ₈ H ₁₀	4387.1	4607.1	4471.6	4591

Fuente: Michael J. Moran, the Ohio State University, after Table 7-2 in his book *Availability Analysis: A Guide to Efficient Energy Use*, ASME Press, New York, 1989.

ag, Gas; l, liquid; s, solid.

**“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA CENTRAL DE VAPOR
EXPERIMENTAL A DIFERENTES CARGAS ELÉCTRICAS CON COMBUSTIBLE GLP”**

Anexo D.

Cálculo de la exergía química del GLP

CALCULO DE EXERGIA DEL COMBUSTIBLE GLP

MASAS MOLARES					
C3H8					
ATOMO	# ATOMOS EN MOLECULA	MASA (PESO) ATOMICO	UNIDAD	PESO	
C	3	12	g/mol	36	g/mol
H	8	1	g/mol	8	g/mol
		masa molar	C3H8	44	g/mol

C4H10					
ATOMO	# ATOMOS EN MOLECULA	MASA (PESO) ATOMICO	UNIDAD	PESO	
C	4	12	g/mol	48	g/mol
H	10	1	g/mol	10	g/mol
		masa molar	C4H10	58	g/mol

COMPOSICION DEL GLP - ECUADOR:

Indice de composición Xi C3H8 =	0,7	—————▶	700 g C3H8/ 1 kg GLP
Indice de composición Xi C4H10 =	0,3	—————▶	300 g C4H10 / 1 kg GLP

CALCULO DE MASA MOLECULAR POR INDICE DE COMPOSICION DEL GLP:

$$P \text{ molar C3H8} = 44 \text{ g/mol} \longrightarrow \frac{1 \text{ mol C3H8}}{44 \text{ g C3H8}}$$

$$\frac{1 \text{ mol C3H8} * 700 \text{ g C3H8}}{44 \text{ g C3H8} \cdot 1 \text{ kg C3H8}} =$$

15,91 mol C3H8 / kg C3H8

$$P \text{ molar C4H10} = 58 \text{ g/mol} \longrightarrow \frac{1 \text{ mol C4H10}}{58 \text{ g C4H10}}$$

$$\frac{1 \text{ mol C4H10} * 300 \text{ g C4H10}}{58 \text{ g C4H10} \cdot 1 \text{ kg C4H10}} =$$

5,17 mol C4H10 / kg C4H10

$$P \text{ molar GLP [mol/kg]} = P \text{ molar C3H8} + P \text{ molar C4H10}$$

$$P \text{ molar GLP [mol/kg]} = 21,08$$

P molar GLP [kmol/kg] = 0,02108

$$Ex q_{gas} = \sum_1^n x_i * Ex_i + R * T_0 * \sum_1^n x_i * \ln(x_i)$$

Ex q C3H8 = 2149,000	kJ/mol	Tabla de Advanced Engineering Thermodynamics
Ex q C4H10 = 2802,500	kJ/mol	Tabla de Advanced Engineering Thermodynamics
R = 0,008314	kJ/mol.K	Constante de los gases ideales
To = 293,150	K	Temperatura ambiente

$$Ex q \text{ GLP [kJ/mol]} = 2.343,56$$

$$Ex q \text{ GLP [kJ/kmol]} = 2.343.561,17$$

$$Ex q \text{ GLP [kJ/kg]} = 2,343,2561,17 \frac{kJ}{kmol} * 0,02108 \frac{kmol}{kg}$$

Ex q GLP [kJ/kg] = 49.405,80

**“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA CENTRAL DE VAPOR
EXPERIMENTAL A DIFERENTES CARGAS ELÉCTRICAS CON COMBUSTIBLE GLP”**

Anexo E.

Calor específico del agua a diferentes temperaturas entre 0°C y 100°C

Calor específico del agua entre 0 °C y 100 °C

www.vaxasoftware.com

Temp. °C	Calor específico		Temp. °C	Calor específico		Temp. °C	Calor específico	
	<u>kJ</u> K·kg	<u>kcal</u> K·kg		<u>kJ</u> K·kg	<u>kcal</u> K·kg		<u>kJ</u> K·kg	<u>kcal</u> K·kg
0 (hielo)	1,960	0,468	34	4,178	0,999	68	4,189	1,001
0	4,217	1,008	35	4,178	0,999	69	4,189	1,001
1	4,213	1,007	36	4,178	0,999	70	4,190	1,001
2	4,210	1,006	37	4,178	0,999	71	4,190	1,001
3	4,207	1,005	38	4,178	0,999	72	4,191	1,002
4	4,205	1,005	39	4,179	0,999	73	4,192	1,002
5	4,202	1,004	40	4,179	0,999	74	4,192	1,002
6	4,200	1,004	41	4,179	0,999	75	4,193	1,002
7	4,198	1,003	42	4,179	0,999	76	4,194	1,002
8	4,196	1,003	43	4,179	0,999	77	4,194	1,002
9	4,194	1,002	44	4,179	0,999	78	4,195	1,003
10	4,192	1,002	45	4,180	0,999	79	4,196	1,003
11	4,191	1,002	46	4,180	0,999	80	4,196	1,003
12	4,189	1,001	47	4,180	0,999	81	4,197	1,003
13	4,188	1,001	48	4,180	0,999	82	4,198	1,003
14	4,187	1,001	49	4,181	0,999	83	4,199	1,004
15	4,186	1,000	50	4,181	0,999	84	4,200	1,004
16	4,185	1,000	51	4,181	0,999	85	4,200	1,004
17	4,184	1,000	52	4,182	1,000	86	4,201	1,004
18	4,183	1,000	53	4,182	1,000	87	4,202	1,004
19	4,182	1,000	54	4,182	1,000	88	4,203	1,005
20	4,182	1,000	55	4,183	1,000	89	4,204	1,005
21	4,181	0,999	56	4,183	1,000	90	4,205	1,005
22	4,181	0,999	57	4,183	1,000	91	4,206	1,005
23	4,180	0,999	58	4,184	1,000	92	4,207	1,005
24	4,180	0,999	59	4,184	1,000	93	4,208	1,006
25	4,180	0,999	60	4,185	1,000	94	4,209	1,006
26	4,179	0,999	61	4,185	1,000	95	4,210	1,006
27	4,179	0,999	62	4,186	1,000	96	4,211	1,006
28	4,179	0,999	63	4,186	1,000	97	4,212	1,007
29	4,179	0,999	64	4,187	1,001	98	4,213	1,007
30	4,178	0,999	65	4,187	1,001	99	4,214	1,007
31	4,178	0,999	66	4,188	1,001	100	4,216	1,008
32	4,178	0,999	67	4,188	1,001	100 (gas)	2,080	0,497
33	4,178	0,999						