

*Universidad de Matanzas  
Sede "Camilo Cienfuegos"  
Facultad de Ciencias Técnicas*



**PRUEBAS TERMOTÉCNICAS AL GENERADOR DE VAPOR DE LA  
UNIVERSIDAD DE MATANZAS**

**Trabajo de Diploma en opción al título Ingeniero Mecánico**

**Autor: Eddys Yoel Fernández Quiñones**

*Matanzas, 2021*

*Universidad de Matanzas  
Sede “Camilo Cienfuegos”  
Facultad de Ciencias Técnicas*



**PRUEBAS TERMOTÉCNICAS AL GENERADOR DE VAPOR DE LA  
UNIVERSIDAD DE MATANZAS**

**Trabajo de Diploma en opción al título Ingeniero Mecánico**

**Autor: Eddys Yoel Fernández Quiñones**

**Tutor: Roberto Vizcón Toledo. Prof. Titular y Dr.C.**

*Matanzas, 2021*

## **DECLARACIÓN DE AUTORIDAD**

Por medio de la presente declaro que soy el único autor de este trabajo de diploma y, en calidad de tal, autorizo a la Universidad de Matanzas a darle el uso que estime más conveniente.

## NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Miembros del Tribunal:

---

Presidente

---

Secretario

---

Vocal

## RESUMEN

Actualmente es muy común el uso de generadores de vapor a nivel industrial, en una gran cantidad de aplicaciones y procesos que cuentan con consumos considerables de combustible a lo largo del tiempo. En el trabajo se expone un método para la evaluación de la eficiencia energética y el impacto ambiental del generador pirotubular #1 ubicado en el área de calderas de la Universidad de Matanzas. Se describen las pérdidas de calor que se producen en la caldera y los valores esperados de las mismas. Mediante el uso del analizador portátil de la combustión con medición directa del CO<sub>2</sub> Kane 455 y al termómetro infrarrojo UNI-T modelo UT305A/B/C y UT306A/B/C, así como la instrumentación presente en el área de trabajo se determina la composición de los gases de la combustión en cuanto a su concentración de O<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub>-CO de la caldera, los cuales son necesarios para el cálculo del rendimiento energético aplicando los métodos convencionales directo e indirecto y un método aproximado que se considera indirecto dependiendo de las variables del tiempo de funcionamiento del quemador y de la bomba. Se determinan modelos experimentales para caracterizar sus índices de desempeño energético por día de trabajo, a saber, la eficiencia de la caldera [%] los consumos de petróleo expresados [kg. Petróleo/día] y de agua [kg. Agua/día]. Se realizan recomendaciones para la operación eficiente y segura del generador de vapor. Se estima el impacto ambiental que produce el funcionamiento de la instalación. Se realizaron recomendaciones para la operación eficiente y segura del generador de vapor objeto de estudio.

## ABSTRACT

At the moment it is very common the use of generators of vapor at industrial level, in a great quantity of applications and processes that have considerable consumptions of fuel along the time. In the work a method is exposed for the evaluation of the energy efficiency and the environmental impact of the generating pirotubular #1 located in the area of boilers of the University of Matanzas. The losses of heat are described that take place in the boiler and the prospective values of the same ones. By means of the use of the portable analyzer of the combustion with direct mensuration of the CO<sub>2</sub> Kane 455 and to the infrared thermometer UNITE-T model UT305A/B/C and UT306A/B/C, as well as the present instrumentation in the work area the composition of the gases of the combustion is determined as for its concentration of O<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub>-CO of the boiler, which are necessary for the calculation of the energy yield applying the direct and indirect conventional methods and an approximate method that it is considered indirect depending on the variables of the time of operation of the burner and of the bomb. Experimental models are determined to characterize their indexes of energy acting for day of work, that is, the efficiency of the boiler [%] the expressed consumptions of petroleum [kg. Petroleum / day] and of water [kg. it Dilutes / day]. they are carried out recommendations for the efficient and sure operation of the generator of vapor. He/she is considered the environmental impact that produces the operation of the installation. They were carried out recommendations for the efficient and sure operation of the generator of vapor study object.

## TABLA DE CONTENIDO

Introducción .....	1
Capítulo I .....	6
Capítulo I. Generadores de vapor de tubos de fuego. ....	6
1.1    Importancia de los generadores de vapor. ....	6
1.2    Características del generador de vapor.....	7
1.2.1 Características del generador de vapor objeto de estudio. ....	8
1.3    Métodos de cálculo de la eficiencia energéticas en calderas .....	9
1.3.1    Eficiencia de combustión.....	12
1.3.2    Eficiencia térmica .....	13
1.3.3    Eficiencia exergética del Generador de vapor. ....	13
1.3.4    Otros factores.....	14
1.3.5    Las reglas más elementales para vigilar la eficiencia de una caldera son: .	14
1.4    Indicadores de desempeño energéticos. ....	14
1.5    Composición elemental de los combustibles. ....	15
1.6    Tipos fundamentales de combustibles en Cuba. ....	17
1.6.1    Caracterización del fueloil.....	18
1.7    Influencia de las propiedades del combustible en la construcción y funcionamiento de los generadores de vapor.....	19
1.8    Energía renovable.....	21
1.8.1    Energía hidráulica: .....	22
1.8.2    Energía eólica: .....	22
1.8.3    Biomasa/materia orgánica:.....	22
1.8.4    Energía solar: .....	22
1.8.5    Energía marina o de movimiento de aguas oceánicas: .....	23
1.9    Energía no renovable.....	23
1.9.1    Combustibles fósiles:.....	23
1.9.2    Energía nuclear: .....	24
1.10    Eficiencia energética.....	24
1.10.1    Eficiencia energética en sistemas de uso de energía no renovable. ....	24
1.11    Impacto del desprendimiento de gases a la atmósfera y medidas tomadas por Cuba. 25	25
1.11.1    Contaminación Ambiental. ....	25
1.11.2    Impacto ambiental.....	27
1.12    Aporte de Cuba a la mitigación de los problemas ambientales. ....	27
1.12.1    Algunas de las características de las normas cubanas para evaluar la emisión de gases a la atmósfera. ....	28
1.12.2    Efecto de los contaminantes sobre el área donde se esparcen las emisiones.	29
1.13    Método práctico para medir la composición de los gases de escape en el generador de vapor.....	32
1.14    RESUMEN DEL CAPÍTULO I.....	33

Capítulo II.....	35
Capítulo II. Evaluación Termodinámica y los índices de desempeño energético del generador de vapor #1 de la Universidad de Matanzas. ....	35
2.1 Métodos y materiales.....	35
2.2 Prueba termotécnica del generador de vapor.....	35
2.3 Descripción de los equipos en el área de calderas de la Universidad de Matanzas.....	36
2.4 Descripción de la instrumentación.....	38
2.5 Registros y mediciones que se realizaron.....	39
2.6 Metodologías de cálculo de la eficiencia de operación de la caldera.....	40
2.6.1 Método directo de cálculo de la eficiencia bruta de operación del generador de vapor.....	40
2.6.2 Método indirecto de cálculo de la eficiencia bruta de operación del generador de vapor.....	42
2.7 Calculo del rendimiento exergético del Generador de Vapor.....	46
2.8 Cálculo de Nb por ecuación experimental de los tiempos de encendido de quemador y bomba de agua propuesta por (Cárdenas Vizcón, 2019).....	47
2.9 Índices de desempeño energético de la caldera de la cocina comedor universitaria.....	48
2.10 Estimación del impacto ambiental por uso del petróleo en la caldera.....	49
2.11 Modelación experimental y procesamiento estadístico de las variables medidas y calculadas durante la prueba termotécnica de las calderas.....	50
2.12 Diagnóstico de recorrido del estado técnico y funcionamiento del generador de vapor y del proceso de transporte y uso del vapor.....	51
Capítulo III.....	52
Capítulo III. Análisis y discusión de los resultados.....	52
3.1 Resultados de las mediciones de la prueba termotécnica al generador de vapor #1 de la Universidad de Matanzas.....	52
3.2 Resultados del registro de raciones preparadas en un día de prueba y el consumo de combustible correspondiente.....	53
3.3 Cálculos de la eficiencia de operación de la caldera por el método de los tiempos de funcionamiento de quemador-bomba.....	54
3.4 Recomendaciones a partir del diagnóstico energético de la caldera #1 de la Universidad de Matanzas.....	55
3.5 Calculo de los índices de desempeño energético de la caldera en su función de generar vapor para cocción de alimentos.....	56
3.6 Cálculo de la huella ecológica por combustión de petróleo y de daño estimado del ambiente.....	56
Conclusiones.....	58
Recomendaciones.....	59
Referencias Bibliográficas.....	60
Anexos.....	66
Anexo 1: Manual del analizador portátil de la combustión con medición directa del CO2 Kane 455.....	66
Anexo 2: Termómetro infrarrojo UNI-T modelo UT305A/B/C y UT306A/B/C.....	67
Anexo 3: Caldera No.1 de la Universidad de Matanzas objeto de estudio.....	68
Anexo 4: Foto del Tanque de agua fuera de la casa de calderas.....	73



Anexo 5: Fotos tomadas en el período de pruebas dentro de la casa de calderas .....	74
Anexo 6: Corridas de software TK Solver para cálculos de índices energéticos del Generador de vapor de la Universidad Camilo Cienfuegos.....	76

## INTRODUCCIÓN

Actualmente los sistemas y cadenas de producción industriales y comerciales abarcan muchos procesos, gran parte de estos procesos requieren del uso y aprovechamiento de fluidos caloportadores, los cuales son suministrados por calderas o generadores de vapor. Las aplicaciones de las calderas industriales son muy diversas, dentro de las que se incluyen: la industria alimenticia, cervecerías, empresas de limpieza, hospitales, industrias de materiales de construcción, industrias automotrices, generación de electricidad, industria metalúrgica, refinerías de petróleo, entre otras (BOSCH, 2012).

En Cuba se lleva a cabo un programa nacional de desarrollo económico y social hasta el año 2030 (Consejo de Estado de la República de Cuba, 2015) que incluye el perfil energético que recientemente ha quedado legalizado por el Decreto Ley 345 de la República de Cuba (Gaceta Oficial de la República de Cuba GOC, 2019) y cuyo título es “Desarrollo de las fuentes renovables de energía y uso eficiente de la energía”, este tiene visión de actualidad y un futuro que alcance la autosuficiencia energética del país, dicho programa tiene dos líneas fundamentales, la primera es relativa a las mejoras de la eficiencia energética de las instalaciones que usan fuentes primarias de energía a partir de combustibles fósiles y la segunda el desarrollo del uso de las fuentes renovables de energía, esta última principalmente a partir de los parques fotovoltaicos, eólicos y las centrales eléctricas de biomásas (bagazo de caña, residuos orgánicos de cosechas, bosques energéticos). Este programa requiere que cada territorio, entidad y viviendas tengan elaborado su programa de desarrollo energético medible a partir de reducir los consumos de todos los tipos de portadores energéticos que se utilicen a la vez que mejoren los índices de productividad y de calidad de vida de forma sostenible (Consejo de Estado de la República de Cuba, 2015).

Entre las tecnologías energéticas más utilizadas se encuentran los procesos de transformación de la energía debido a la combustión de materiales orgánicos de origen fósil, tales como el petróleo, carbón y gas natural; de las biomásas; y los biocombustibles.

Las emisiones que provoca el proceso de combustión causan grandes daños a corto, mediano y largo plazo al ecosistema local y general.

En Cuba funcionan más de 4000 calderas igneotubulares también llamadas de tubos de fuego en las cuales se consumen importantes cantidades de petróleo crudo nacional mezclado con fueloil del tipo PCM 800 hasta PCM 1500.

Las calderas son equipos de transformación de energía que normalmente operan continuamente o durante largos periodos de trabajo, condición que propicia un alto consumo energético en el tiempo. Tal situación hace que sea importante conocer el desempeño energético de estos equipos. Ya que, sabiendo su comportamiento energético, se puede programar su mantenimiento para reducir los costos de operación de los mismos.

Las calderas o generadores de vapor son equipos que transfieren el calor proveniente de la combustión de algún combustible, ya sea gaseoso, líquido o sólido, para producir vapor o calentar fluidos y luego ser aprovechado en determinado proceso.

Las calderas varían extensamente en su diseño dependiendo del método de combustión usado, el combustible utilizado, el campo de uso, tipo de circulación de agua empleada, y la presión del vapor. A continuación, se presentan solo dos de las clasificaciones encontradas en la literatura para calderas: en función de la disposición de los fluidos y del tipo de fluido caloportador (Uceda Martínez, 2012).

Según el paso del fluido caloportador, existen calderas acuotubulares y calderas pirotubulares. Las primeras son aquellas en las que el agua o fluido caloportador se desplaza por el interior de los tubos, mientras que los gases de combustión circulan por el exterior de los mismos; contrario a las calderas pirotubulares, donde los gases de combustión circulan por el interior de los tubos.

Según la tecnología existen: calderas de agua caliente que llevan el agua a una temperatura inferior a los 100 °C, calderas de agua sobrecalentada que calientan por encima de los 110 °C, calderas de vapor que calientan el agua y producen su cambio de

estado de la fase líquida a la gaseosa y las calderas de fluido térmico que utilizan un fluido caloportador diferente al agua.

Las calderas pirotubulares son de baja potencia, mientras que las acuotubulares son de alta potencia ya que la producción de vapor de las primeras puede llegar hasta un máximo de 60 ton/h en el caso de calderas pirotubulares de dos pasos, a una presión máxima de 30 bar. En el caso de las calderas de alta potencia, estas alcanzan producciones de vapor de hasta 2.000 ton/h a presiones superiores a los 100 bar (Eberhard, 2012).

En un estudio realizado (Lozano, 1986), los autores utilizan el método de separación de pérdidas para la determinación de la eficiencia energética en calderas.

En otro estudio titulado “Metodología de cálculo de la eficiencia térmica de generadores de vapor (Golato, et al., 2008), se realiza la evaluación energética de dos calderas acuotubulares y una comparación entre el método de entrada salida y el método de balance de energía para el cálculo de la eficiencia.

Por otra parte, en el 2017 se publicó una guía técnica sobre el procedimiento de inspección periódica de eficiencia energética para calderas (ATECYR, 2017). La guía detalla los procedimientos para la determinación de la eficiencia energética mediante el método directo y el método indirecto, así como ensayos y los equipos de medición necesarios.

La Universidad de Matanzas cuenta con dos instalaciones con más de 20 años de explotación que han sido la base del sistema de cocción de alimentos y consumen casi el 10% de la energía equivalente total planificada donde a su vez el consumo de la energía eléctrica representa el 60% del total. Se sabe que hace más de 15 años que se estudia el funcionamiento de estas calderas a partir de trabajos de diplomas realizados donde más recientemente se ha estado tratando de proponer los índices de consumo de petróleo, pero diversas causas han impedido su materialización.

En este trabajo se desarrolla una metodología para determinar la eficiencia energética y los índices de consumo de petróleo y agua de la caldera #1 de la Universidad. Para el

desarrollo del proyecto se utiliza el *software* de solución de ecuaciones de ingeniería “*TK Solvers*”.

### Problema de Investigación

Se desconoce la relación existente entre el consumo de vapor que demanda la cocción de alimentos de la cocina comedor universitaria con el gasto de combustible del generador de vapor, esto impide determinar su eficiencia de operación y establecer el índice de desempeño energético correspondiente.

### Hipótesis

A partir de realizar las pruebas termotécnicas al generador de vapor, se podrá calcular el rendimiento de operación del mismo y compararlo con su condición de máxima eficiencia, esto permitirá establecer la relación entre los gastos de combustible para la producción de vapor que demanda según los tipos y cantidades de comidas preparadas, lo que será de estricto control para los operadores de la instalación.

### Objetivo General

Realizar prueba termotécnica de la caldera de la Universidad de Matanzas utilizando el analizador portátil de la combustión *KANE 455* para establecer recomendaciones de operación eficiente y mejor desempeño energético.

### Objetivos Específicos

- Estudio de la documentación técnica del analizador portátil de la combustión y traducir su manual de funcionamiento.
- Poner en funcionamiento el analizador portátil de la combustión Kane 455
- Conocer la condición termodinámica actual del generador de vapor de la Universidad de Matanzas.
- Realizar mediciones para pruebas termotécnicas para conocer y mejorar la operación de los generadores de vapor.

- Definir y determinar los índices de desempeño energético y los modelos de explotación eficiente, segura y prolongada de los generadores de vapor.

#### Tareas a Desarrollar

1. Actualizar el estado del arte relativo al funcionamiento eficiente de calderas de tubos de fuego.
2. Estudiar los trabajos investigativos realizados con anterioridad al generador de vapor.
3. Utilizar el analizador portátil de la combustión *Kane 455* en la prueba de caldera.
4. Propuesta de experimento para las mediciones de prueba termotécnica al generador de vapor.
5. Utilizar *software "TK Solver"* para calcular el rendimiento termodinámico de los generadores de vapor.
6. Modelar estadísticamente los índices de operación del generador de vapor determinando el error estadístico de los modelos.

# CAPÍTULO I

## Capítulo I. Generadores de vapor de tubos de fuego.

En la realización de la tarea investigativa relativa a determinar los índices de desempeño energético de la caldera de vapor #1 de la Universidad de Matanzas fue necesario revisar el estado del arte en lo concerniente a las temáticas: importancia, características de los generadores de vapor y sus métodos de cálculo de eficiencia, índices de desempeño energéticos, composición y tipos fundamentales de los combustibles utilizados en Cuba y la influencia de sus propiedades en la construcción y funcionamiento de los generadores de vapor, el impacto ambiental por uso de la energía y las medidas tomadas por Cuba, la realización de mediciones y su procesamiento de datos experimentales.

### 1.1 Importancia de los generadores de vapor.

El generador de vapor, como su nombre lo indica, tiene la función de producir vapor para ser utilizado en la generación de energía mecánica o eléctrica y para la alimentación a equipos de proceso. Hoy en día este equipo es un elemento esencial en el funcionamiento de prácticamente todas las empresas industriales. No erróneamente, se ha llegado a plantear que el generador de vapor es el corazón de toda industria moderna.

Las empresas industriales necesitan energía para su funcionamiento, generalmente en su forma primaria, el calor, o como electricidad. De ahí que siempre se requiera la presencia de generadores de vapor para producir el vapor que suministrará el calor o que generará la energía eléctrica. En aquellos casos en que la industria prescindiera de tener sus propios equipos, tendrá que tomar energía eléctrica del sistema nacional, la que en una buena medida es producida en centrales termoeléctricas con potentes generadores de vapor.

En el mundo moderno, la energía para usos industriales tiene varias fuentes: la energía química de las sustancias combustibles, la energía potencial del agua acumulada en embalses, la energía eólica, la energía atómica, la energía solar, la energía de las mareas y otras. Pero, a pesar de existir diversas fuentes, aún la mayor parte se obtiene a partir de la energía química liberada, en forma de calor, por los combustibles (fósiles o renovables)

al quemarse estos en los hogares de los generadores de vapor; de aquí, que el correcto diseño de estos equipos, su óptima construcción y su eficiente operación, sean de gran importancia y singular interés, máxime si se tiene en cuenta que los recursos combustibles fósiles del mundo son limitados y su mala utilización, además de contribuir a su agotamiento, significa pérdidas económicas para cualquier nación. Compromete también en el sentido acotado, que los generadores de vapor son, junto al transporte, los mayores emisores de  $2\text{ CO}$  a la atmósfera y por lo tanto altamente responsables del efecto invernadero y el calentamiento global.

Para Cuba, país de limitados recursos energéticos, y en el que prácticamente la casi totalidad del vapor y la electricidad se generan a partir de la energía química de los combustibles, la explotación eficiente de sus equipos de generación de vapor tiene objetivamente una importancia vital (Rubio Gonzales, 2015).

## **1.2 Características del generador de vapor**

Los generadores de vapor pueden ser clasificados atendiendo a diversos criterios relacionados con sus parámetros, características constructivas y de operación. Omitiendo las generalidades y centrándose en el caso particular objeto de estudio, se puede realizar la clasificación siguiente del generador de vapor objeto de estudio, según (Engineering, University of Surrey of Department of Chemical & Process, 2010) y (Empresa: TECNIK LTDA, 2012).

Según su movilidad:

- Fija o estacionaria

Según la presión de trabajo:

- Baja presión: 0 a 2,5 kg/cm<sup>2</sup>
- Media presión: 2,5 a 10 kg/cm<sup>2</sup>
- Alta presión: 10 a 220 kg/cm<sup>2</sup>



- Supercríticas: más de 223 kg/cm<sup>2</sup>

Según su generación:

- De agua caliente
- De vapor saturado o recalentado

Por su construcción:

- De tubos de fuego o piro-tubulares. Son generadores de vapor pequeños. En ellos los gases calientes (fuego) circulan por dentro de los tubos, mientras que el agua se encuentra alrededor de estos.

Por su capacidad:

- Pequeños. Son generadores de vapor de pequeñas producciones y operación a bajas presiones. Se instalan en empresas industriales pequeñas, tintorerías, hospitales, comedores, laboratorios, hoteles y pueden encontrarse también en centrales azucareros de poca capacidad de producción. Generalmente suministran vapor saturado y su producción de vapor es  $D < 20\ 000$  kg/h y su presión:  $P < 2,0$  MPa.

Por la forma de circulación del agua:

- De circulación natural. En ellos la sustancia de trabajo se mueve por el principio del termosifón, como resultado de la diferencia de densidad entre el agua y la mezcla agua – vapor que se genera.

### **1.2.1 Características del generador de vapor objeto de estudio.**

El generador de vapor de la Universidad de Matanzas que constituye el objeto de investigación es el No.1 de tipo piro-tubular de capacidad de 2500 (kg/h) cuyos datos generales según su chapa son:

- N.º De serie: PFM2.5-28

- Producción hora de vapor: 2500kg/h
- Superficie de transferencia de calor: 87m<sup>2</sup>
- Presión máxima de trabajo: 13kg/cm<sup>2</sup>
- Combustible que utiliza: Fueloil

*Tabla 1.3 Caracterización del trabajo de la caldera evaluada de la Universidad de Matanzas.*

Se somete a jornadas de trabajos de no más de un máximo de 2 horas de quemador encendido diariamente, a unos regímenes de explotación definido por los siguientes valores y sus parámetros: Presión del vapor saturado: Pva	Entre 6 y 8 atm
Temperatura del agua de alimentar: Ta	Oscila entre 30 y 40 °C
Temperatura del combustible: Tc	Se eleva hasta 140°C
Coeficiente de exceso de aire: $\alpha$	Combustión real
Combustible:	Mezcla de petróleo crudo nacional con fueloil: PCN 800 de alto azufre

Según estos datos y basados en las condiciones en las que trabaja el equipo se puede definir valores medios de algunos parámetros, que permitirá conocer otros, de vital necesidad para el cálculo.

### **1.3 Métodos de cálculo de la eficiencia energéticas en calderas**

El balance térmico del generador de vapor se realiza fundamentalmente para determinar su eficiencia o rendimiento porque el gasto fundamental en operación es debido al combustible consumido, por tanto, la eficiencia con que trabaja un generador de vapor es desde el punto de vista de la economía, el concepto más importante, pues caracteriza con qué efectividad el equipo capta, para la generación de vapor, el calor liberado por el combustible. El rendimiento de los generadores de vapor depende, en gran medida, de la efectiva utilización del combustible, lo cual a su vez está determinado fundamentalmente por dos factores:

- una combustión completa del combustible.
- el grado de enfriamiento de los gases producto de la combustión.

El calor entregado por los productos de la combustión llega hasta la sustancia de trabajo a través de las superficies de transferencia del generador de vapor. Este calor aprovechado es lo que se ha denominado calor útil, debido a que no todo el calor liberado en el proceso de combustión se utiliza para producir el vapor pues una parte de él se pierde por diferentes causas. La igualdad entre el calor suministrado al generador de vapor llamado calor disponible y la suma del calor útil y las pérdidas de calor, se determinan por medio del balance térmico.

Este análisis cuantitativo de las cantidades de energía que se transforman en el generador de vapor, permite determinar el rendimiento térmico y el consumo necesario de combustible.

El rendimiento térmico de los generadores de vapor depende de muchos factores entre los que se encuentran:

- El tipo de combustible y sus propiedades.
- La eficiencia del sistema de combustión.
- Las características de las superficies de intercambio térmico.
- El tipo de transferencia de calor que tiene lugar en los mismos.
- La velocidad de las sustancias que intercambian calor.
- La diferencia de temperaturas entre los fluidos que intercambian calor.
- La calidad del aislamiento térmico.
- Las sedimentaciones que pueden producirse en la superficie de intercambio térmico, que se comportan como una resistencia (Tanquero Díaz, 2002).

Durante el cálculo térmico del generador de vapor, el objetivo del balance de calor es determinar la eficiencia, el calor útil y el gasto de combustible. Este último es imprescindible para calcular los volúmenes totales de gases y poder efectuar el cálculo térmico de cada uno de los equipos. Ahora bien, el objetivo central del balance de calor,

en la prueba termotécnica, es determinar la eficiencia del generador de vapor y su gasto de combustible, con el fin de, al compararlos con los datos de chapa y con las recomendaciones, poder conocer como está funcionando para, de presentar dificultades poder subsanarlas.

Existen dos métodos para efectuar el balance de calor, lo que proporciona dos formas para determinar la eficiencia y el gasto de combustible, seguidamente se verán en detalle.

a) Balance indirecto.

El balance indirecto consiste en determinar el valor de cada una de las pérdidas y con estas la eficiencia del generador de vapor

La aplicación de este método de balance es un poco más compleja que la del que se verá a continuación, pero tiene la ventaja que permite analizar por separado la magnitud de las pérdidas, lo que facilita la localización de los puntos de ineficiencia en un generador de vapor en operación, mediante la prueba termotécnica. En el caso del cálculo térmico este método es el único factible.

El cálculo del calor útil que va a la sustancia de trabajo se debe hacer mediante la ecuación del balance térmico.

b) Balance directo.

El balance directo consiste en medir el gasto de combustible (energía consumida) y la generación de vapor y sus parámetros (energía útil) directamente en el generador de vapor durante la prueba termotécnica y determinar la eficiencia.

Se está obligado en este punto del estudio a hacer un análisis en relación a cuál de los dos métodos de balance debe ser empleado para la determinación de la eficiencia de un generador de vapor durante su prueba termotécnica. Sobre este particular se puede plantear lo siguiente:

- ✓ En ambos métodos resulta necesaria la medición de ciertos parámetros en el generador de vapor:

Balance indirecto, fundamentalmente: CO<sub>2</sub>, CO y O<sub>2</sub>, y análisis de cenizas.

Balance directo, fundamentalmente: Dsc, psc, tsc y B.

Teniendo en cuenta lo anterior, resulta útil valorar los parámetros a medir según el método y la instrumentación que tiene la caldera para su operación, para tomar decisiones sobre la necesidad y posibilidad de medición de parámetros.

- ✓ El balance indirecto proporciona la posibilidad de analizar por separado cada pérdida y determinar los posibles puntos de ineficiencia del equipo.
- ✓ El balance directo permite con más facilidad, dadas las características de los parámetros a medir en él, la automatización de la evaluación de la eficiencia con que opera la caldera.
- ✓ Ambos métodos implican la medición de parámetros en cuyo proceso pueden cometerse errores. La exactitud del resultado queda definida por la calidad de las mediciones (instrumentos y cuidado en su empleo) y no por el método empleado.

Por todo lo apuntado anteriormente se recomienda que siempre que sea factible se apliquen ambos métodos y sus resultados se comparen para tratar de obtener una valoración más exacta del trabajo del generador de vapor (Rubio Gonzales, 2015).

### **1.3.1 Eficiencia de combustión**

La eficiencia de combustión de una caldera es la indicación de la capacidad del quemador para quemar combustible.

Los dos parámetros que determinan la eficiencia del quemador son las cantidades de combustible no quemadas en los gases de escape y los excesos de oxígeno en el escape.

A medida que aumenta la cantidad de exceso de aire, la cantidad de combustible no quemado en el escape disminuye.

Esto resulta en la reducción de las pérdidas de combustible sin quemar, pero elevando las pérdidas de entalpía. Por lo tanto, es muy importante mantener un equilibrio entre las

pérdidas de entalpía y las pérdidas quemadas. La eficiencia de combustión también varía con el combustible que se está quemando.

La eficiencia de combustión es mayor para combustibles líquidos y gaseosos que para combustibles sólidos.

### **1.3.2 Eficiencia térmica**

Se ve influida de manera directa por el rendimiento de la caldera como intercambiador de calor que transfiere la energía térmica de los tubos de gases al lado del agua.

Hay que tener en cuenta que la eficiencia térmica se ve gravemente afectada por la formación de hollín en los tubos de la caldera.

### **1.3.3 Eficiencia exergética del Generador de vapor.**

El análisis de exergía combina la primera y segunda ley de la termodinámica, y es una herramienta eficaz para analizar tanto la cantidad como la calidad de la utilización de la energía. Éste es el máximo trabajo útil que puede obtenerse conforme a la irreversibilidad de los procesos y la forma en que las irreversibilidades destruyen la exergía (Kotas, 2012).

El grado de perfección termodinámica de un generador de vapor depende fundamentalmente de la eficiencia del proceso de la combustión y de la transferencia de calor de la llama y los gases a alta temperatura al agua a través de la superficie metálica de los tubos.

El rendimiento energético se allá por la relación de exergía útil que gana el agua para convertirse en vapor dividido por la exergía con que entra el combustible a la caldera. El rendimiento energético de un generador de vapor numéricamente siempre es menor que el rendimiento energético según la primera ley de la termodinámica esto lo podemos demostrar en (Cengel & Boles, 2014).

### **1.3.4 Otros factores**

La eficiencia general de la caldera depende de muchos más parámetros, aparte de la combustión y la eficiencia térmica. Estos otros parámetros incluyen pérdidas de encendido-apagado, pérdidas de radiación, pérdidas por convección, pérdidas de soplado, etc.

### **1.3.5 Las reglas más elementales para vigilar la eficiencia de una caldera son:**

Controlar temperatura de humos.

Controlar exceso de aire.

Controlar el aislamiento.

Comprobar nivel de purgas.

Controlar limpieza en los quemadores y en el cuerpo de la caldera.

## **1.4 Indicadores de desempeño energéticos.**

Los indicadores de rendimiento energético son métricas que se utilizan para cuantificar los resultados de una determinada acción o estrategia en función de unos objetivos predeterminados; es decir, indicadores que nos permiten medir el éxito de nuestras acciones ( Abdelaziz, et al., 2010) (Norma ISO 50001, 2018).

Todos los indicadores de rendimiento energético deben cumplir con ciertas características básicas:

- **Medible:** Por definición un indicador de rendimiento energético debe ser medible.
- **Alcanzable:** Los objetivos planteados a la hora de establecer un indicador de rendimiento energético deben ser creíbles.
- **Relevante:** No debe generar exceso de información innecesaria, sino aquella información de interés.

- Disponible a tiempo: Cada indicador de rendimiento energético debe ajustarse a unos plazos de tiempo razonables.

Teniendo en cuenta el tipo de industria, las características de la planta y los diferentes procesos productivos que se realizan, se podrán diferenciar entre cuatro tipos distintos de indicadores de rendimiento energético:

- Indicadores de rendimiento energético a Nivel de Organización: se basan en el consumo total de una organización. Sobre éstos, se calculan los ahorros energéticos año a año y su progreso contrastado con las metas definidas en su Política Energética.
- Indicadores de rendimiento energético de Consumo de Combustibles Fósiles: referidos al consumo de combustibles fósiles, en todas sus formas como carbón, gas natural, fueloil, comúnmente utilizados en la industria, tanto para procesos químicos y metalúrgicos, como para calefacción de recintos, según los requerimientos de los procesos productivos.
- Indicadores de rendimiento energético de Consumo de combustible para Transporte: En los casos en donde las organizaciones incorporen el transporte intensivo y la distribución en sus procesos productivos.
- Indicadores de rendimiento energético de Consumo de Electricidad

### **1.5 Composición elemental de los combustibles.**

Los combustibles orgánicos, en los que se incluyen entre otros el petróleo y el bagazo, están constituidos por:

- Sustancias combustibles.
- Impurezas minerales no combustibles.
- Humedad.



Las impurezas minerales no combustibles y la humedad constituyen elementos indeseables en los combustibles, pues reducen el calor específico de combustión (por unidad de masa) y crean otros trastornos en la operación. Estos elementos suelen llamarse lastres del combustible.

Las sustancias combustibles, que constituyen la parte útil de los combustibles, se componen de:

C - Carbono

H - Hidrógeno

O- Oxígeno

N - Nitrógeno

S – Azufre

El carbono es el elemento principal de la parte combustible, pues es el que más calor desprende, ya que, aunque el hidrógeno de forma específica por unidad de masa desprende más, se encuentra siempre en mucha menor cuantía y el azufre desprende poco calor durante su combustión.

El oxígeno y el nitrógeno, como componentes de las sustancias combustibles, constituyen lastres orgánicos, ya que disminuyen la cantidad de elementos combustibles en dichas sustancias y por lo tanto disminuyen el calor liberado de forma específica, es decir, por unidad de masa.

El azufre constituye la impureza más perjudicial contenida en el combustible, pues provoca una intensa corrosión especialmente en las superficies de baja temperatura, dada por la presencia en los gases de la combustión de  $\text{SO}_2$  y algo de  $\text{SO}_3$  si las condiciones son favorables para su formación- lo que acarrea el surgimiento de ácido sulfúrico que ataca el metal de las superficies de transferencia de calor.

El azufre también resulta perjudicial, desde el punto de vista de la contaminación ambiental, pues los gases sulfurosos que origina van a parar a la atmósfera, lo que debe ser combatido y significa gastos adicionales en inversiones o durante la operación. Existen normas que limitan la concentración máxima de SO<sub>2</sub> permisible en el ambiente: concentración máxima instantánea 0,5 mg/m<sup>3</sup> y concentración máxima promedio del día 0,15 mg /m<sup>3</sup>.

Uno de los métodos utilizados para la eliminación del SO<sub>2</sub> de los gases de la combustión, consiste en lavarlos con una solución de amoníaco. Otro método, que tiene buenas perspectivas, consiste en la adsorción del SO<sub>2</sub> con ayuda de carbón activado. En la actualidad se trabaja para, en sistemas de combustión en lecho fluidizado eliminar el azufre haciéndolo reaccionar y formar compuestos estables que se extraen con los residuos del horno (Rubio Gonzales, 2015).

## **1.6 Tipos fundamentales de combustibles en Cuba.**

El combustible es el elemento clave en el trabajo de los generadores de vapor, especialmente en su economía; baste decir que el costo fundamental en la generación de vapor está dado por el costo del combustible consumido (aproximadamente 80 % del costo de operación). Por esta razón apuntada, resulta necesario antes de continuar este estudio, proceder a un análisis de los diferentes combustibles utilizados en la generación de vapor de Cuba.

Los combustibles pueden clasificarse, de acuerdo con su estado físico en condiciones naturales, en: sólidos, líquidos y gaseosos. De cada uno de estos tipos, en la actualidad, el hombre utiliza una buena variedad de combustibles, siendo los más importantes en Cuba los siguientes:

- Sólidos
- Bagazo.
- RAC (Residuos Agrícolas Cañeros)

- Residuos de cosechas agrícolas y forestales
- Líquidos
- Aceite combustible pesado (fueloil o petróleo)
- Gaseosos
- Aceite combustible ligero (gas oíl o diésel)
- Gas natural (incluye gas acompañante del petróleo)
- Gas artificial y biogás.

En la relación anterior se han incluido los que tienen importancia universal y además los que tienen una importancia particular para Cuba.

En el país los principales combustibles utilizados para generar vapor son: el aceite combustible pesado (conocido como fueloil o simplemente como petróleo combustible) en la industria eléctrica, y el bagazo en la industria azucarera. En calderas pequeñas se utiliza también en aceite combustible ligero (diésel). En estos momentos ya se explotan en el país plantas generadoras de electricidad con gas natural como combustible (gas acompañante del petróleo). Algunas son plantas con turbinas de gas y tienen un ciclo combinado con caldera recuperadora de calor y turbina de vapor. Se utilizan, además, a escala industrial, aunque en cantidades pequeñas, los RAC (Residuos Agrícolas Cañeros) (Rubio Gonzales, 2015).

### **1.6.1 Caracterización del fueloil**

Se le llama fueloil al residuo que queda después de destilar el gas oíl en la base de la torre, lugar de donde se extrae, es un líquido negro y viscoso de excelente poder calórico, que puede ser utilizado como combustible en termoeléctricas, barcos, fábricas de cemento y vidrio, etcétera. El fueloil generalmente constituye entre un 30 y un 50 % del rendimiento de la destilación mientras que la demanda es mucho mayor en el caso de las fracciones más ligeras, por eso las refinerías modernas utilizan técnicas de conversión

química para obtener los productos que necesitan los usuarios. Entre esos métodos son importantes los diversos procesos de "*cracking*" que rompen las moléculas grandes de las fracciones pesadas para formar moléculas más pequeñas y valiosas. Con las técnicas del cracking térmico, las moléculas se rompen por el calor. Este rompimiento reduce la viscosidad del residuo alimentado para producir un fueloil comerciable, que requiere menos mezcla con productos de mayor valor. En los procesos de cracking catalítico, las fracciones pesadas se desintegran en presencia de un catalizador que, es una sustancia que causa cambios químicos sin que ella sufra modificaciones en el proceso (Rubio Gonzales, 2015).

### **1.7 Influencia de las propiedades del combustible en la construcción y funcionamiento de los generadores de vapor.**

El combustible es, sin lugar a dudas, el elemento que mayor influencia tiene tanto sobre la construcción, como sobre el funcionamiento de los generadores de vapor.

Detalles constructivos:

- a) El combustible decide el tipo de horno del generador de vapor, sus dimensiones y características del diseño (constructivas y de funcionamiento). De acuerdo con el combustible, debe elegirse un horno que garantice un correcto mezclado de éste con el aire, y que logre una combustión lo más completa posible de toda la masa.
- b) Los quemadores se seleccionan de acuerdo al tipo de combustible y en correspondencia con el modo de combustión seleccionado. Los quemadores, a su vez, influyen sobre el sistema de suministro de aire, el que debe garantizar la cantidad necesaria y con una forma de descarga adecuada para lograr un correcto mezclado.
- c) La temperatura de los gases a la salida del generador de vapor está en correspondencia principalmente, con el contenido de azufre en el combustible, esta temperatura influye grandemente en la eficiencia de la caldera; además, decide sobre ciertos detalles constructivos, de acuerdo con el método que se haya elegido para contrarrestar los efectos corrosivos del azufre.

d) El espaciamiento de los tubos de las superficies convectivas está en función del combustible, pues éste decide la cantidad de gases que fluirán por unidad de tiempo, y debe, combinándose esos dos parámetros, garantizarse una velocidad adecuada de los gases, para lograr una buena transferencia de calor.

e) En todo el cálculo térmico del generador de vapor, es decir, en el cálculo de la transferencia de calor, se tiene en cuenta el coeficiente de ensuciamiento de los gases, el cual depende del tipo de combustible; esto influye sobre la construcción de las superficies de intercambio, especialmente sobre su tamaño y disposición.

f) La temperatura de los gases a la salida del horno se establece por las características de fusibilidad de la ceniza, lo que depende del combustible. Esta temperatura influye decisivamente sobre las dimensiones del horno y en especial sobre su apantallamiento.

g) El sistema de extracción de residuos del horno, que es un elemento fundamental en la construcción de la caldera, queda condicionado por la cantidad de ceniza que trae el combustible y por el estado físico en que serán extraídas.

h) Si el combustible es de alto contenido de azufre, deben preverse quemadores auxiliares de gas oíl para el arranque; con esto se evita que los gases que contienen,  $SO_2$ ,  $SO_3$  y vapor de agua, se pongan en contacto con superficies frías durante el arranque. Podría también elegirse el uso de conductos derivadores de gases (bypass) en las zonas de bajas temperaturas -como el calentador de aire- para en los momentos de arranque y trabajo a carga parcial desviar gases y evitar situaciones críticas.

i) El tipo de combustible determina el exceso de aire a utilizar en el horno, por lo tanto, influye sobre el volumen de gases, lo que a su vez impacta sobre los detalles constructivos de la chimenea y los ventiladores, y sobre la eficiencia del generador de vapor.

Seguidamente, las principales cuestiones de la operación que se ven influidas por el tipo de combustible que se use:

- a) El combustible define prácticamente la eficiencia máxima que puede lograrse en una caldera. Los líquidos y gases resultan los mejores y con ellos se obtienen las eficiencias más altas.
- b) La automatización de la operación se ve influida por el combustible; los líquidos y los gases presentan buenas características para la automatización; siendo engorrosa la misma en los sólidos, por lo difícil que es la medición del flujo del propio combustible.
- c) Los combustibles sólidos obligan a operaciones periódicas de extracción de residuos del horno.
- d) El contenido de ceniza y sus características incrustantes determinan los períodos de paradas para limpiezas y la programación de las limpiezas durante la operación.
- e) La presencia de azufre en el combustible influye decisivamente sobre los períodos de reparación general. Igualmente, influye sobre la operación al tenerse que colocar quemadores auxiliares de gas oíl y adoptar algunas otras medidas.

## **1.8 Energía renovable**

El consumo de energía es uno de los grandes medidores del progreso y bienestar de una sociedad. El concepto de "crisis energética" aparece cuando las fuentes de energía de las que se abastece la sociedad se agotan. Un modelo económico como el actual, cuyo funcionamiento depende de un continuo crecimiento, exige también una demanda igualmente creciente de energía. Cuba tiene en su programa de desarrollo energético (Consejo de Estado de la República de Cuba, 2015) alcanzar un crecimiento hasta llegar al 24% de la generación de electricidad a partir de fuentes renovables. Se denomina energía renovable a la energía que se obtiene de fuentes naturales virtualmente inagotables, ya sea por la inmensa cantidad de energía que contienen, o porque son capaces de regenerarse por medios naturales. Entre las energías renovables se encuentran: la eólica, biomasa, solar fotovoltaico y solar térmico, hidroeléctrico, geotérmico (Ellaban, et al., 2014). Comprende aquellas energías cuya renovación es mayor a la cadencia de uso. No obstante, si el ritmo de uso, también puede sobrepasarse tal como es el caso de la sobre utilización de biomasa (sobre uso de leña) para generar calefacción. La

regeneración de estas energías puede ser natural o artificial ( Agencia Internacional de Energía, AIE , 2019).

### **1.8.1 Energía hidráulica:**

Es el caso del agua que por efecto de la energía potencial gravitatoria desciende de las montañas formando cursos de agua como ríos. El movimiento del agua río abajo genera energía cinética. Esta energía potencial se transforma en energía hidroeléctrica al pasar por turbinas de generación eléctrica.

### **1.8.2 Energía eólica:**

Se refiere a la energía contenida en las grandes masas de aire que se desplazan por la superficie del planeta producto de la acción del Sol. Es así, que la energía cinética de las masas de aire se convierte en energía mecánica para luego transformarse en energía eléctrica en una turbina eólica.

### **1.8.3 Biomasa/materia orgánica:**

Es la energía del Sol almacenada en la materia orgánica. Como es sabido, las plantas y algunos microorganismos tienen la capacidad de guardar esta energía en forma química mediante el proceso de la fotosíntesis. El proceso básicamente utiliza luz solar, agua y el CO<sub>2</sub> troposférico, para formar moléculas orgánicas compuestas de en carbono, hidrógeno y oxígeno.

### **1.8.4 Energía solar:**

Es la energía proveniente de la radiación electromagnética del Sol. En este caso, a diferencia del caso anterior, se usa directamente mediante las tecnologías desarrolladas para este fin. Esta energía, en forma de calor y luz, puede aprovecharse por medio de células fotoeléctricas, heliostatos o colectores solares, que la convierten en energía eléctrica o térmica.

### **1.8.5 Energía marina o de movimiento de aguas oceánicas:**

El movimiento de las aguas marinas en océanos y mares son un almacén interminable de energía cinética, y que, utilizando la tecnología apropiada, es posible transformarla en energía eléctrica. La energía marina poder ser: mareomotriz (energía de la diferencia de mareas), undimotriz (energía del movimiento de las olas) y conversión térmica (OTEC, *Ocean Thermal Energy Conversion*) (energía que utiliza la diferencia térmica de los océanos).

## **1.9 Energía no renovable**

Las energías no renovables o energías convencionales son las fuentes de energía que se encuentran en la naturaleza en cantidades limitadas, las cuales, una vez consumidas en su totalidad, no pueden sustituirse, ya que no existe sistema de producción o de extracción económicamente viable (Abas, et al., 2015).

### **1.9.1 Combustibles fósiles:**

Se derivan los combustibles fósiles de materia orgánica que se ha entrampado entre las capas de sedimentos dentro de la Tierra por millones de años (Ferrari, L., 2013). Hay tres tipos de combustibles fósiles:

1. El carbón es el combustible fósil más abundante y se espera que los suministros duren mucho más tiempo que otros combustibles fósiles.
2. El petróleo es un líquido de alto contenido de carbono formado de vegetación y animales fósiles. Se encuentran depósitos de aceite intercalado entre las piedras en la Tierra. En los pozos perforados las cañerías se hunden abajo de los depósitos para bombear el aceite fuera.
3. El gas natural, es el combustible fósil más eficaz, barato y limpio para convertirlo en energía utilizable.



### **1.9.2 Energía nuclear:**

Esta energía proviene del proceso de fisión nuclear del núcleo de uranio. Al momento de la división del núcleo se libera una gran cantidad de energía en forma de radiación y calor utilizada para generar electricidad o energía termonuclear. El uso de tecnología nuclear requiere un combustible radiactivo. La mena de uranio está presente en yacimientos de la tierra en concentraciones relativamente bajas y con minas en 19 países. Este uranio enriquecido o refinado, uranio-238, se usa para alimentar los reactores nucleares de energía para generar calor e impulsar las turbinas generadoras de electricidad finalmente. Este recurso energético proporciona 6% de la energía del mundo y 13–14% de la electricidad del mundo aproximadamente (Jaiswal, 2015).

### **1.10 Eficiencia energética.**

Se refiere a la utilización de tecnologías que requieren una menor cantidad de energía para conseguir el mismo rendimiento o realizar la misma función. La eficiencia energética se centra en la tecnología, el equipamiento o la maquinaria usada en edificios. El ahorro de energía se basa en el modo de actuar de las personas para utilizar menos energía (por ejemplo, utilizar luz natural en lugar de artificial para reducir el consumo de electricidad). Es importante la Eficiencia Energética ya que el consumo de energía mundial está creciendo, el coste de la energía se está incrementando, la elevada dependencia energética del exterior y el cambio climático (Steeep, 2020). La Gestión de la Energía tiene que ver con el uso sistemático de herramientas de gestión y tecnología para mejorar el rendimiento energético de una organización. Para ser totalmente eficaz, necesita estar integrada, ser proactiva y debería abarcar la compra de energía, la eficiencia energética y las energías renovables (Altomonte, et al., 2003).

#### **1.10.1 Eficiencia energética en sistemas de uso de energía no renovable.**

El 90 % de las necesidades energéticas de nuestro planeta son satisfechas con la utilización de combustibles fósiles (petróleo, gas, carbón). Todos ellos agotables, fuertemente contaminantes y utilizados en forma ineficiente, por el interés predominante de la producción de energía sobre el de su efecto ecológico.

La importancia de reducir el consumo de estas fuentes primarias se ha transformado de un problema económico a un problema vital, y de un problema vital del futuro a uno de los mayores accidentes que ya padecemos en el desarrollo de la humanidad. La acidez de las lluvias, las catástrofes naturales, las consecuencias del efecto invernadero y de la disminución de la capa de ozono, son secuelas que debemos curar con una nueva vía de producción energética que recorre desde el control de los procesos actuales y el incremento de su eficiencia hasta el cambio de estructuras a una utilización descentralizada de las fuentes renovables, inagotables y de bajo impacto ambiental (Campos, et al., 2008).

Para cualquier empresa o institución desarrollar estos cambios sin tener en cuenta su rentabilidad sería particularmente desastroso, sin embargo, el camino puede recorrerse, contrario a lo que comúnmente se piensa, mejorando posiciones de mercado. Además de ser la fuente energética más barata y menos contaminante de todas las fuentes ya que no sólo no afecta el medio, sino que reduce la contaminación ambiental, la eficiencia energética no es una fuente despreciable.

## **1.11 Impacto del desprendimiento de gases a la atmósfera y medidas tomadas por Cuba.**

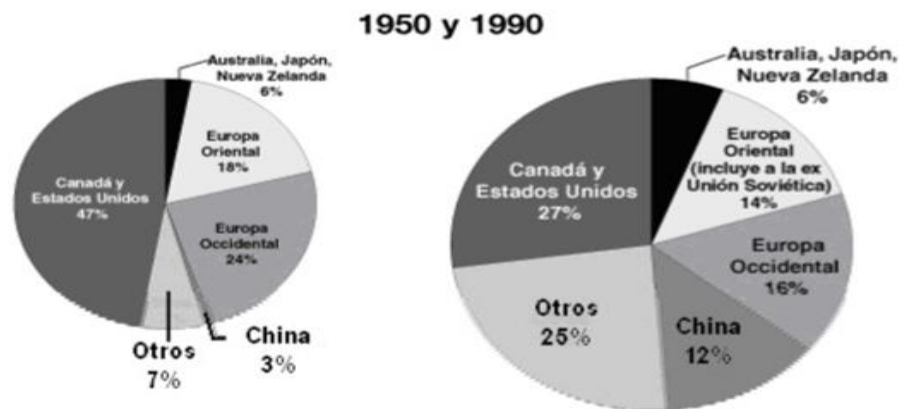
### **1.11.1 Contaminación Ambiental.**

El dióxido de carbono CO<sub>2</sub> constituye el enlace indispensable que une al Sol con la Tierra por el intercambio bioquímico que permite que la energía luminosa se "incorpore" a los sistemas vivientes. A partir de la energía solar y con la intervención de moléculas como la clorofila y el agua, participa en la construcción de alimentos a través de la fotosíntesis en las plantas verdes (autótrofos). La energía contenida en los alimentos puede ser aprovechada dentro de la célula de la misma planta o de cualquier otro organismo (organismo heterótrofo) mediante procesos de oxidación que permiten "quemar" esos compuestos a través del proceso de respiración y así, el CO<sub>2</sub> regresa a la atmósfera. (Enfoque Isotérmico de Problemas Ambientales, 2009).

La quema de combustibles fósiles que mantuvieron por miles de años al carbono sedimentado en las profundidades y que ahora son utilizados como gas, petróleo y gasolina, ha puesto en circulación (en la atmósfera) enormes cantidades de carbono.

A continuación, se ofrece un gráfico donde demuestra la emisión de gases de tipo invernadero en las regiones más pobladas del planeta y un gráfico que muestra la emisión de gases por regiones geográficas.

Figura 1.10.1 Emisiones de dióxido de carbono por regiones.



Actualmente la contaminación atmosférica de las centrales eléctricas, los vehículos y las instalaciones industriales, toma numerosas formas. Una cuarta parte de la población mundial viven en zonas donde las concentraciones de contaminantes atmosféricos son peligrosas para la salud. Los contaminantes orgánicos persistentes como ahora son los policlorados P.C.B. y el diclorodimetiltricloroetano D.D.T., se acumulan en seres vivos y pueden provocar cáncer.

La lluvia ácida formada por óxidos de sulfuros y nitrógeno ha estropeado cosechas, vida acuática y además corroe los edificios (Contaminación Ambiental, 2009), (Rodríguez Palmero, 2005).

Uno de los elementos que más influye sobre el efecto invernadero es el dióxido de carbono en la atmósfera (alrededor del 50%) y su impacto aumenta en la medida que consumimos combustibles fósiles, permitimos la tala de bosques en toda la superficie

terrestre y continuamos contaminando el mar con desechos y derrames de productos químicos. Otros contaminantes que contribuyen al efecto invernadero son el metano y los clorofluorocarbonos (CFC's, utilizados como propelentes de aerosoles y en sistemas de refrigeración) (Protocolo de Kyoto, 2009).

### **1.11.2 Impacto ambiental**

Las calderas industriales y de servicio son potencialmente contaminantes del medio ambiente, las condiciones de sobredimensionamiento y bajo factor de carga, favorecen durante los momentos del arranque y hasta que se logre la homogeneidad en la mezcla y la estabilidad en la combustión la emisión de partículas de combustible que atraviesan todo el tracto de gases y salen por la chimenea sin combustionar llevando al medio ambiente su carga contaminante. Para determinar el impacto ambiental que produce una caldera, se determina la cantidad de CO<sub>2</sub>, que se emite al ambiente producto de la combustión. (Jiménez Borges, 2015).

### **1.12 Aporte de Cuba a la mitigación de los problemas ambientales.**

En la Estrategia Ambiental Nacional se ha identificado el deterioro del saneamiento y las condiciones ambientales en los asentamientos humanos y la contaminación de las aguas terrestres y marinas entre los principales problemas ambientales del país determinado en gran medida por el manejo deficiente de los desechos generados por la población y las actividades productivas y de servicios. De las fuentes principales de contaminación inventariadas por el Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente, sólo el 54 % cuenta con algún tipo de tratamiento de residuales, en muchos casos en notable estado de deterioro (Rodríguez Palmero, 2005).

La implementación de la Evaluación del Impacto Ambiental (EIA) en el país, entre otros objetivos, tiene implícita la intención de evitar que las nuevas inversiones contribuyan al incremento de las cargas contaminantes que se emiten actualmente al medio ambiente y se deterioren aún más las condiciones higiénico-sanitarias en las áreas de influencia de los proyectos, al posibilitar lo siguiente:

- Evaluación de las tecnologías utilizadas, evitando el uso de aquellas no idóneas para alcanzar los objetivos propuestos. Modificación de propuestas no apropiadas.
- Evaluación de los diseños de los sistemas de tratamiento y disposición final.
- Establecimiento de la línea base a partir de la descripción de las variables ambientales en el área de influencia del proyecto.
- Prevención y mitigación de los impactos adversos en el medio circundante y potenciación de los positivos. Mejoramiento de la calidad de los efluentes vertidos al medio y de las condiciones de saneamiento ambiental en las zonas de influencia de los sistemas de tratamiento y disposición final.
- Ejecución de programas de caracterización y monitoreo de afluentes, efluentes y variables ambientales. Monitoreo del funcionamiento actual de los sistemas de tratamiento del país.
- Análisis del impacto ocasionado por la utilización de infraestructura existente, evitando las sobrecargas y propiciando su mejor utilización o rehabilitación, en caso de sobre dimensionamiento o estado deficiente, respectivamente.

### **1.12.1 Algunas de las características de las normas cubanas para evaluar la emisión de gases a la atmósfera.**

En la Figura que se presenta a continuación se detallan las concentraciones máximas admisibles vigentes en Cuba según la Norma Cubana NC 39/1999. (Calidad de Aire. Requisitos higiénico-sanitarios).

Figura 1.11.1 Concentraciones máximas permisibles para zonas habitables en Cuba.

Contaminante	Concentración Máxima Permisible	
	Promedio Diario (24 horas, mg/m <sup>3</sup> )	Promedio Diario (24 horas, µg/m <sup>3</sup> )
Dióxido de Azufre (SO <sub>2</sub> )	0,05	50
Partículas Sólidas Suspendidas (Hollín)	0,05	50
Monóxido de Carbono (CO)	3,00	3000
Óxidos de Nitrógeno (NO <sub>2</sub> )	0,04	40
Hidrocarburo (Benceno)	0,80	800
Ozono	0,03	30

### 1.12.2 Efecto de los contaminantes sobre el área donde se esparcen las emisiones.

La contaminación atmosférica reviste gran importancia, debido a su enorme impacto directo sobre la salud humana. Cada persona adulta respira 15-28 m<sup>3</sup>/día de aire y posee una superficie alveolar en sus pulmones de alrededor de 65 m<sup>2</sup>. La mayoría de los contaminantes presentes en el aire puede encontrar fácilmente su camino hacia la sangre, debido a que la transferencia de materia a través de la pared de los capilares pulmonares es muy poco selectiva.

Los gases van a penetrar más o menos en función de la solubilidad en agua, por lo que a mayor solubilidad menor penetración ya que se quedaría retenido en la garganta o boca, y a menor solubilidad mayor posibilidad de penetración en el organismo (puede llegar al pulmón y se podría transportar a la sangre), los contaminantes gaseosos más importantes son: CO: Tiene escasa solubilidad en agua por lo que puede penetrar hasta los alvéolos pulmonares y por lo tanto hasta la sangre formando carboxihemoglobina impidiendo que se una el oxígeno a la hemoglobina impidiendo por tanto su transporte y se produce la asfixia, como dato podemos decir que la afinidad del CO por la hemoglobina es 200 veces mayor que la del O<sub>2</sub>.

Los efectos tóxicos van a depender de la cantidad de CO unido a la hemoglobina y del tiempo de exposición. La vida media de carboxihemoglobina es de 4h, por lo que para que se produzca la muerte es necesario que el tiempo de exposición sea grande al igual que la concentración de CO. El CO tiene efectos serios sobre la salud, principalmente respiratorios y cardio-vasculares.

En concentraciones altas, puede causar la muerte, en tiempos de exposición relativamente cortos. En concentraciones menores, como aquellas existentes en el aire urbano, el CO afecta la capacidad de transporte de oxígeno en la sangre. El oxígeno y el monóxido de carbono son transportados dentro del cuerpo humano por la hemoglobina (molécula encontrada en los glóbulos rojos).

El CO<sub>2</sub> generado en la actividad metabólica es transportado por la sangre hacia los pulmones, donde se intercambia por O<sub>2</sub>, el que entra en la circulación sanguínea, mediante la acción de la hemoglobina. Desgraciadamente, la afinidad del CO con la hemoglobina es 200 veces mayor que la correspondiente al oxígeno. La hemoglobina a la cual se ha adherido CO se llama carboxihemoglobina (COHb), la que no puede transportar O<sub>2</sub> hacia las células.

La vida media de carboxihemoglobina es de 4h, por lo que para que se produzca la muerte es necesario que el tiempo de exposición sea grande al igual que la concentración de CO. Según la OMS, el nivel de COHb en la sangre de las personas expuestas a CO no debiera superar el 2,5%, respecto al contenido total de hemoglobina.

El nivel normal de COHb es de 1,2 % a 1,5 %, cuando el nivel de COHb llega a alrededor del 5 % comienza a inducir efectos nocivos para la salud. Algunos estudios han demostrado que comienza a afectarse la capacidad de raciocinio a niveles de COHb comprendidos entre 3,2 % y 4,2 %.

Exposiciones a concentraciones de 45 mg/m<sup>3</sup> de CO durante más de dos horas afectan la capacidad de raciocinio de una persona. Entre dos y cuatro horas de exposición a 240 mg/m<sup>3</sup> se eleva el nivel de COHb en la sangre entre 10 % y 30 %. La exposición a 1000 mg/m<sup>3</sup> de CO eleva el nivel de COHb en la sangre a más de 30 % y causa un rápido

incremento del pulso, lo que provoca coma y convulsiones. SO<sub>x</sub>: Son muy solubles en agua por lo que tienen poca penetración en el organismo, provocan daño en el tracto superior. Aumenta su posibilidad de penetración por transporte sobre partículas por lo que el daño también aumentaría.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha determinado que los efectos de la exposición de los seres humanos en 24 horas al SO<sub>2</sub> agudizan los síntomas o las enfermedades respiratorias a concentraciones en el ambiente superiores a 100 µg/m<sup>3</sup>. No obstante, en estudios recientes se han observado efectos nocivos del SO<sub>2</sub> a concentraciones más bajas. Estimó que una reducción de 10 µg/m<sup>3</sup> de las concentraciones de SO<sub>2</sub> en el ambiente estaría asociada con una reducción de la mortalidad comprendida entre 0,20 % y 1,21 %, lo que equivaldría a una gama de 15 a 87 decesos por un millón de personas.

El SO<sub>2</sub> produce bronco constricción; dicho efecto aumenta con la actividad física, con la hiperventilación, al respirar aire frío y seco y en personas con hiperactividad bronquial.

De acuerdo a los resultados de estudios epidemiológicos de morbilidad, mortalidad o cambios en la función pulmonar en grupos de población sensible, la Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda que no se supere una concentración de SO<sub>2</sub> de 500 µg/m<sup>3</sup> para una exposición de 10 minutos, o de 250 µg/m<sup>3</sup> para un periodo de 24 horas, o de 50 µg/m<sup>3</sup> para un periodo de un año, este efecto se observa en individuos normales cuando las concentraciones llegan a 13,1 mg/m<sup>3</sup>; los mismos efectos aparecen en individuos sensibles con 2,6 a 5,2 mg/m<sup>3</sup> de SO<sub>2</sub>.

Los efectos combinados de distintos compuestos azufrados que se encuentran en la atmósfera producen una fuerte irritación de las vías aéreas superiores. La presencia de partículas y elevada humedad potencian los efectos tóxicos de la mezcla, ya que el dióxido de azufre es soluble y su retención en las vías aéreas superiores restringe el impacto en los pulmones; cuando se encuentra absorbido en partículas, llega más fácilmente a los pulmones y el daño es mayor. NO<sub>x</sub>: Son poco solubles por que pueden penetrar en el organismo.



El NO<sub>2</sub> es 4 veces más tóxico que el NO. Se pueden formar en el organismo nitrosaminas (son moléculas cancerígenas). Si llega suficiente a la sangre se forma metahemoglobina, donde el hierro está como Fe (3+) por lo que pierde la capacidad de transportar oxígeno produciéndose por tanto la asfixia, también se pueden producir daños en el sistema respiratorio. Los niños, los ancianos y las personas que sufren del corazón, de asma u otras enfermedades pulmonares son grupos de mayor riesgo para la exposición a NO<sub>x</sub>.

El NO<sub>2</sub> es un gas irritante que se absorbe en la membrana mucosa de las vías respiratorias. El efecto más adverso para la salud se produce en la intersección de las vías respiratorias y la región de intercambio gaseoso de los pulmones. Con una disminución de la función pulmonar con efectos directos que abarcan desde la inflamación de la membrana mucosa del árbol traqueobronquial a la bronquitis, la bronconeumonía y el edema pulmonar agudo.

Después de la exposición al NO<sub>2</sub> hay presencia de ácidos nítrico y nitroso o sus sales en la sangre y en la orina. Además, perjudica la visión de las personas que van manejando. La función pulmonar se ve afectada por una exposición de 30 minutos a una concentración de NO<sub>2</sub> de 560 µg/m<sup>3</sup> con ejercicio, 940 µg/m<sup>3</sup> en personas asmáticas y más de 1 300 µg/m<sup>3</sup> en una exposición de 10 a 15 minutos en personas sanas. Se encontró que la exposición a una concentración media diaria de NO<sub>2</sub> de 244 µg/m<sup>3</sup> provocaba dolores de garganta en personas adultas (Rodríguez Palmero, 2005).

### **1.13 Método práctico para medir la composición de los gases de escape en el generador de vapor.**

Se empleará el analizador portátil de la combustión con medición directa del CO<sub>2</sub> Kane 455. El analizador de la combustión KANE455 mide el Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>), Monóxido de Carbono (CO) de los humos (normalizado y no normalizado) y el CO ambiente, temperatura de los humos, ambiente y diferencial, presión (tiro) y presión diferencial. La medición directa del CO<sub>2</sub> se realiza mediante un sensor infrarrojos diseñado por Kane. El CO<sub>2</sub>, se ajusta a cero de forma automática en aire fresco después de realizar la cuenta atrás en la puesta en marcha. Si la pantalla muestra el mensaje PUESTA A CERO DEL GAS cerciőrese de que la sonda está en aire fresco antes de

pulsar la tecla Aceptar. El analizador calcula el Oxígeno (O<sub>2</sub>), la relación CO/CO<sub>2</sub>, las pérdidas, el rendimiento de la combustión (Neto, Bruto o Condensado) y el exceso de aire. El analizador de la combustión KANE455 mide los niveles de monóxido de carbono en aire ambiente. Además, efectúa una prueba de CO ambiente durante 15 minutos. El analizador incorpora una funda de goma protectora con imán para su operación manos libres e incluye una sonda de aspiración de los humos con sensor de temperatura integrado. Su gran pantalla visualiza simultáneamente 4 lecturas y toda la información se puede imprimir en una impresora con comunicación infrarrojos. Los datos impresos pueden ser mediciones en tiempo real o análisis memorizados en el analizador. La memoria del analizador tiene capacidad para: 99 análisis de combustión 20 pruebas de presión 20 pruebas de estanqueidad 20 pruebas de temperatura 20 pruebas de CO ambiente La cabecera del ticket de impresión se puede personalizar en 2 líneas de 20 caracteres cada una. El analizador se controla con 4 teclas de función y un dial rotatorio. La función de las cuatro teclas es la siguiente (de izquierda a derecha):

- Encendido/Apagado del analizador
- Encendido/Apagado de la iluminación de la pantalla y la linterna
- Encendido/Apagado de la bomba de aspiración
- Envío de datos a la impresora o a la memoria Las teclas con los iconos impresos en la carcasa gris del instrumento también hacen la función indicada por los iconos (avance, retroceso, aceptar) (Ver Anexo 1).

#### **1.14 RESUMEN DEL CAPÍTULO I**

1. Se escogieron los métodos de cálculo de eficiencia del generador de vapor por el método directo e indirecto según la literatura especializada, así como se referencia la posibilidad de calcular rendimientos de caldera a partir de los tiempos de funcionamiento del quemador y la bomba de agua.

2. Se coincide con la necesidad de conocer y poder calcular la eficiencia energética en el uso de las fuentes no renovables de energía debido a la incidencia que esto tiene en la economía y el impacto ambiental de Cuba.
3. Se coincide con el criterio de que las calderas igneotubulares tienen tres periodos diferenciados durante su operación y que se calculen los rendimientos en los períodos de funcionamiento del quemador, el resto del tiempo la caldera entregará vapor pero a costa de la auto evaporación y la presión del vapor descendiendo, así como con las pérdidas de calor por radiación convección en la caldera que están permanentemente presentes, esto hace que existan pérdidas de calor adicionales en el servicio que ofrece la caldera.
4. Es necesario la implantación del uso de las fuentes renovables de energía para cambiar la matriz energética hacia la reducción del consumo de combustibles fósiles.

## CAPÍTULO II

### **Capítulo II. Evaluación Termodinámica y los índices de desempeño energético del generador de vapor #1 de la Universidad de Matanzas.**

#### **2.1 Métodos y materiales.**

Se describe la prueba termotécnica realizada al generador de vapor, los equipos, instrumentación y metodologías de cálculo para determinar la eficiencia bruta de operación de la caldera #1, así como sus índices de desempeño energético con ayuda del *software* "TK Solver". Esto permitirá conocer con mayor precisión el aprovechamiento del petróleo consumido con respecto a la cantidad de vapor producido y su utilización en la cocción de alimentos. A continuación, se relacionan estos procedimientos y sus características más importantes.

#### **2.2 Prueba termotécnica del generador de vapor.**

La instalación trabaja en régimen no estacionario, es decir con arranques y paradas durante la demanda vapor para los tachos. Esto hace que en el generador de vapor trabaje su quemador de petróleo y bomba de agua solo una parte del tiempo del total del turno de trabajo que dura el servicio. Siguiendo la experiencia dada por las normas y que aparecen en (Vizcón Toledo, 1997) al respecto, se realizaron mediciones cada 5 minutos durante el trabajo del quemador de petróleo esperando a ver estables (menos de 10% de variación relativa) los valores de composición de gases, temperaturas de gases de escape y presiones de vapor de la caldera. Los métodos de cálculo de eficiencia de caldera desarrollados fueron acordes a este tipo de prueba termotécnica para caldera pirotubular. Durante las pruebas los parámetros más cambiantes son la presión del vapor que estuvo entre (1-6,5) atm y la temperatura de las tapas frontal y trasera de la caldera que estuvo entre (50-110) °C y en menor medida la temperatura de gases de escape entre (150-200) °C. Estos rangos de variación son admisibles según las metodías existentes.

### **2.3 Descripción de los equipos en el área de calderas de la Universidad de Matanzas.**

Los equipos que se describirán son: la caldera de vapor, su quemador de petróleo, la bomba de agua de alimentar, los tanques de almacenamiento de petróleo y de agua caliente, sistema de tratamiento del agua de reposición de la caldera. (Ver anexo 3)

Ciclo de vapor:

El ciclo cuenta con dos calderas, una siempre de reserva y ambas tienen una capacidad de trabajo que supera en más de dos veces la demanda de vapor en la actualidad. La línea de transmisión de vapor entre la caldera y los 4 tachos de la cocina y la línea de retorno de condensado hacia el tanque de almacenaje de agua caliente que alimenta la caldera. Este ciclo tiene superficies calientes no aisladas y fugas de vapor y agua caliente en diferentes localizaciones, todo ello atenta contra el uso eficiente del combustible pues esto no solo dependerá del estado técnico y operación del generador de vapor sino también de estas fugas declaradas.

➤ **Generador de vapor No.1 de la Universidad Matanzas**

Se encuentra dentro de la casa de calderas, también se tiene otra caldera No.2 es de 1500 kg/h de vapor y funciona como reserva o en los períodos de mantenimiento de la caldera No.1. Debido a la situación con el acomodo de carga para los horarios pico (11am hasta 2pm) como parte de las medidas de ahorro acordadas por la UM el quemador se enciende de lunes a sábado durante aproximadamente entre 50 -70 minutos cada día de trabajo. De requerirse más vapor por la cocina se enciende la bomba de agua entre 1-2 minutos más para que mediante la autoevaporación se produzca vapor a más baja presión interna de la caldera y aún pueda mantenerse el servicio de vapor demandado.

➤ **Bomba de agua de alimentar**

Se encuentra dentro de la casa de calderas. La bomba de agua es del tipo GRUNDFOS cuya capacidad de trabajo es de 3 toneladas de agua por hora para presiones de hasta 20 atm. Se conoce que durante el funcionamiento de la caldera se llena la misma a presión

cercana a la atmosférica y antes de encender el quemador de petróleo, su encendido oscila entre 8 y 15 minutos en total durante las 8 horas de trabajo que dura la cocción. Es posible que durante el tiempo de entrega de vapor se requiera un encendido manual de agua hacia la caldera para culminar la cocción de alimentos con una presión de vapor más baja. Debido a que la presión de descarga de la bomba hacia la caldera es baja, se considerará que el caudal entregado varía poco respecto al flujo para capacidad nominal.

➤ Quemador de petróleo

Se encuentra dentro de la casa de calderas, es del tipo -TEKENER FLAME cuyos parámetros de capacidad son presiones de atomización entre: (14-28) atm, y flujos entre (91 –195) kg/h. Esto hace que se pueda esperar un flujo de petróleo para la presión de atomización de 9,5 atm de aproximadamente menor que 90 kg/h. No obstante, el valor del flujo de petróleo se calculó a partir de las lecturas semanales del tanque exterior de combustible y se promedió según las horas de trabajo del quemador.

➤ Tanque de almacenamiento de agua caliente

Se encuentra a la intemperie, tiene una capacidad de 18840 litros, se encuentra bien aislado y con tapa, presenta un termómetro para medir la temperatura del agua.

➤ Tanque de almacenamiento de petróleo

Se encuentra a la intemperie, tiene una capacidad de 51410 litros, no se encuentra aislado y tiene tapa, presenta una regla graduada y calibrada por el organismo competente para ello, esto permite hacer las lecturas semanales del consumo de petróleo.

➤ Sistema de tratamiento del agua de reposición de la caldera

Se encuentra dentro de la casa de calderas, este sistema está compuesto por el desmineralizador (suavizador) y las tuberías y sus accesorios para hacer paso del agua cruda a ser tratada y para los ciclos de lavado de las resinas. Este sistema durante el período de pruebas llevado a cabo no funcionó por estar en reparación por la empresa de calderas. Este problema es muy grave pues atenta contra la seguridad y eficiencia de trabajo de la caldera.

## 2.4 Descripción de la instrumentación

La instrumentación utilizada se muestra en la tabla 2.4 donde aparecen los valores de la sensibilidad o apreciación de cada uno.

*Tabla 2.4 Instrumentos de medición utilizados en la prueba termotécnica*

<i>Instrumento</i>	<i>Plena escala</i>	<i>Precisión</i>	<i>Unidad de medida</i>
Manómetro de vapor de la caldera	16	0.5	Kg/cm <sup>2</sup>
Termómetro del tanque exterior de agua de la caldera	200	5	oC
Termómetro del tanque de petróleo de la caldera	150	2	oC
Manómetro de petróleo de la caldera	15	0.5	Kg/cm <sup>2</sup>
Termómetro de gas en la chimenea	400	5	oC
Medidor de gases Kane 455 para temperatura y composición volumétrica de los gases	100	0.01	%
	600	0.01	oC
Termómetro infrarrojo UNI-T para temperatura de las paredes de la caldera	1200	0.01	oC

Especial interés tiene la utilización del analizador portátil de la combustión con medición directa del CO<sub>2</sub> Kane 455.

Para las mediciones del flujo de combustible se empleó la lectura semanal de la regla graduada del tanque exterior de almacenamiento del petróleo.

No se pudieron medir los flujos instantáneos de vapor, agua y de petróleo, esto hizo que se trabajase con valores aproximados de la capacidad de trabajo de los quemadores y de la bomba de agua a partir de tener en cuenta el tiempo de funcionamiento durante el turno de trabajo de cada uno de ellos.

## 2.5 Registros y mediciones que se realizaron.

Las tablas de registros y mediciones que se realizaron tienen el esquema siguiente:

*Tabla 2.5 Esquema de mediciones en la caldera no.1 en la cocina-comedor de la Universidad de Matanzas*

<i>Inicio de medición</i>	<i>Tiempo encendido del quemador (horas)</i>	<i>Tiempo de bombeo de agua (horas)</i>	<i>Flujo de petróleo o calculado kg/s</i>	<i>Presión de vapor (atm)</i>	<i>Presión de petróleo (atm)</i>	<i>Temperatura del petróleo (oC)</i>	<i>O2 (%)</i>	<i>CO2 (%)</i>	<i>CO (ppm)</i>	<i>T agua (oC)</i>	<i>T aire (oC)</i>	<i>T gases (oC)</i>

En ella se verán los aspectos del funcionamiento del Generador de Vapor, en los que se definen la presión y la temperatura del: combustible y del agua de alimentar, de los gases de escape y su composición. Así como el tiempo de encendido del quemador y de bombeo de agua; como el flujo de petróleo.

*Tabla 2.5.1 Registro de consumo de combustible y raciones preparadas.*

<i>Gasto de combustible medido en el tanque (kg)</i>	<i>Raciones preparadas</i>

En ella se ven los gastos de petróleo y las cantidades de raciones de comidas preparadas.



Tabla 2.5.2 Registro de las cantidades de productos que componen las raciones preparadas

Raciones totales	Arroz (kg)	Frijoles (kg)	Viandas (kg)	Pescado, carne, huevo y pollo (kg)	Harina (kg)

En esta se registran las cantidades y tipos de comidas que integran las raciones por considerar que esto influye en los índices objeto de estudio.

En general la gran importancia de estas tablas será demostrada a lo largo del trabajo, pues de ellas se tomarán los datos para realizar cálculos, y definir aspectos como la eficiencia en el funcionamiento y los índices de desempeño energético.

## 2.6 Metodologías de cálculo de la eficiencia de operación de la caldera.

Según (Pérez Garay, 1986), (Gonzales, 2000), la determinación de la eficiencia de una caldera fue posible calcular la misma con la ayuda del *software* “TK Solver”.

### 2.6.1 Método directo de cálculo de la eficiencia bruta de operación del generador de vapor.

Se calcula el rendimiento ( $\eta_b$ ) a partir de cuantificar los flujos y entalpías del agua, vapor, combustible, aire y gases.

$$B = [Qu / (Qd \times \eta_b)] \times 100\% ; \text{ (kg/s)} \quad (2.1)$$

Donde:

B: consumo de combustible; kg/s

Qu: Calor útil; (kJ/s)

Qd: calor disponible a transferir por la caldera; (kJ/kg)

$\eta_b$ : eficiencia del GV por método directo; (%)

$$Q_u = D_{vs} (i_{vs} - i_a) \quad (2.2)$$

Donde:

$i_{vs}$ ,  $i_a$ : entalpías del vapor y del agua de alimentar; kJ/kg

$D_{vs}$ : flujo de vapor producido por la caldera, kg/s

$$Q_d = Q_{bc} + Q_{pca} + Q_{at} + Q_{fc} \quad (2.3)$$

Donde:

$Q_{bc}$ : calor específico de combustión del petróleo; kJ/kg

$Q_{pca}$ : calor suministrado si hay precalentamiento de aire para combustión; kJ/kg

$Q_{at}$ : calor suministrado si hay atomización del petróleo con vapor para combustión; kJ/kg

$Q_{fc}$ : Calor suministrado por calentamiento sensible previo del petróleo para combustión; kJ/kg

$$Q_{fc} = C_p * t_c \quad (2.4)$$

Donde:

$C_p$ : calor específico del petróleo; kJ/(kg.°C)

$t_c$ : temperatura de calentamiento del petróleo; °C

$$C_p = 1.738 + 0.0025 * t_c \quad (2.5)$$

### 2.6.2 Método indirecto de cálculo de la eficiencia bruta de operación del generador de vapor.

Se calcula el rendimiento ( $\eta_b$ ) a partir de cuantificar las pérdidas de calor.

$$\eta_b = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 + q_7), (\%) \quad (2.6)$$

Donde:

q2: Pérdidas de calor por los gases de escape.

q3: Pérdidas de calor por incombustión química del combustible.

q4: Pérdidas de calor por incombustión mecánica del combustible.

q5: Pérdidas de calor por enfriamiento exterior.

q6: Pérdidas de calor sensible con la ceniza. Para petróleo se omite.

q7: Pérdidas por purga. (En este caso la purga no es continua, por lo cual se omite de los cálculos).

Cada pérdida de calor se calcula por separado según:

$$q_2 = Q_2 / Q_d * 100, (\%) \quad (2.7)$$

$$Q_2 = (i_{gs} - a_{gs} * i_{af}) (1 - q_4 / 100), (\text{kJ/kg}) \quad (2.8)$$

Donde :

Q2: pérdida de calor por gases calientes de salida o escape por chimenea; (kJ/kg)

Qd: calor disponible a transferir por la caldera; (kJ/kg)

igs: entalpía de los gases de salida por chimenea; (kJ/kg)

iaf: entalpía del aire atmosférico para combustión; (kJ/kg)

ags: coeficiente de exceso de aire en los gases de salida de la caldera; (adimensional)

$$igs = Cgs * Vgs * tgs \quad (2.9)$$

Donde:

Cgs: calor específico de los gases de salida de la caldera; (kJ/(m<sup>3</sup>\*°C))

Vgs: volumen de los gases de salida de la caldera;(m<sup>3</sup>N/kg.).

$$Vgs = Vco2 + Vco + Vh2 + Vch4 + Vn2 + (ags - 1) * Vair + Vvap \quad (2.10)$$

CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>, AIR, VAP: Contenido volumétrico de estos elementos en los gases secos, (%)

tgs : temperatura de gases de salida, (oC)

$$q3 = (Q3 / Qd) * (100 - q4) \quad (2.11)$$

$$q3 = (60 * (CO) / (CO2 + CO)) * (100 - q4) / 100 \quad (2.12)$$

$$Q3 = Vgs(30.2CO + 25.8H2 + 85.5CH4)(1 - q4 / 100) \quad (2.13)$$

Donde:

Q3: pérdida de calor por incombustión química del petróleo; (kJ/kg)

Vgs: volumen de los gases de salida de la caldera; (m<sup>3</sup>N/kg.).

CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>: Contenido volumétrico de estos elementos en los gases secos, (%).

$$q_4 = Q_4 / Q_d * 100 \quad (2.14)$$

Donde:

Q<sub>4</sub>: pérdida de calor por combustible no quemado; (kJ/kg)

Para combustibles sólido pulverizados q<sub>4</sub>=0.5-5.0 %

Para combustibles líquidos y gaseosos q<sub>4</sub>=0.5 (despreciable)

$$q_5 = (Q_5 / Q_d) * (100 - q_4) \quad (2.15)$$

$$q_5 = (\text{alfaConv} * TP_m * AT_{gv}) * B, \text{(kJ/kg)} \quad (2.16)$$

$$\text{alfaConv} = [8.4 + 0.06 * (TP_m - t_{air})] / 860 \quad (2.17)$$

$$AT_{gv} = ATF + ATT + ATL \quad (2.18)$$

Donde:

Q<sub>5</sub>: pérdida de calor por superficies exteriores calientes; (kJ/kg)

alfaConv: coeficiente de termotransferencia de calor de superficies exteriores calientes; (kW/(m<sup>2</sup>. °C), (Mikheyev, 1968).

AT<sub>gv</sub>: superficie total de la caldera; (m<sup>2</sup>)

TP<sub>m</sub>: temperatura media de las paredes exteriores calculada; (°C)

tair: temperatura aire ambiente; (°C)

Esta pérdida depende de las dimensiones del generador de vapor, de la temperatura superficial y de la temperatura del aire exterior.

El software TK Solver requiere el valor de la temperatura media (TPm) para las 3 paredes exteriores de la caldera (área de pared frontal-ATF y su temperatura TF, área de pared trasera-ATT y su temperatura TT y área de pared envolvente-ATL y su temperatura TL).

$$TPm = \frac{TF * ATF + TT * ATT + TL * ATL}{ATF + ATT + ATL} \quad (2.19)$$

Los valores medidos con el termómetro infrarrojo UNI-T se registran en una tabla como la siguiente:

*Tabla 2.6.2. Resultados de la medición de temperatura exterior de la caldera*

$TF \text{ } ^\circ C$	$TT \text{ } ^\circ C$	$TL \text{ } ^\circ C$	$TPm = \frac{TF * ATF + TT * ATT + TL * ATL}{ATF + ATT + ATL} \text{ } ^\circ C$

$$q6 = Q6 / Qd * 100 \quad (2.20)$$

Puede evaluarse a partir de la cantidad de ceniza que se extrae del horno, su calor específico y su temperatura, solamente se tiene en cuenta para combustibles sólidos. El método indirecto permite calcular el consumo de combustible una vez aplicado también el método directo de calcular el rendimiento del generador de vapor.

Para realizar los cálculos descritos anteriormente se utilizó el programa informático “TK Solver”, para comprobar los resultados. Esto contribuyó a eliminar los errores que se originan de forma manual y realizar las operaciones con gran rapidez.

## 2.7 Calculo del rendimiento exergético del Generador de Vapor.

Se calcula el rendimiento exergético del generador de vapor ( $Ex_{GV}$ ) se calcula por:

$$Ex_{GV} = \frac{100 * Ex_{util}}{Ex_{pet}} ; (\%) \quad (2.21)$$

Donde:

$Ex_{util}$ : exergía útil con el vapor producido, (W)

$Ex_{pet}$ : exergía del petróleo, (W)

$$Ex_{\acute{u}til} = D_{vs} * ((i_{vs} - i_a) - (t_{air} + 273) * (s_{vs} - s_a)) \quad (2.22)$$

Donde:

$s_{vs}$ : entropía del vapor que sale de la caldera, (J/kg.K)

$s_a$ : entropía del agua de entrada a la caldera, (J/kg.K)

$$Ex_{pet} = K * Q_d * B * 1000 \quad (2.23)$$

Donde:

$K$ : coeficiente de equivalencia exergética del combustible, (adimensional)

## 2.8 Cálculo de Nb por ecuación experimental de los tiempos de encendido de quemador y bomba de agua propuesta por (Cárdenas Vizcón, 2019).

Este método se considera como indirecto y es propuesto por (Cárdenas Vizcón, 2019). Se sabe que los equipos de impulsión de flujos trasiegan una cantidad instantánea de volumen de trabajo que está relacionada con el incremento de presión que provocan, el tipo de fluido y el rendimiento volumétrico de la bomba. Se ha considerado que, a partir de los valores dados por el fabricante del flujo nominal, el caudal total trasegado será función directa del tiempo de trabajo o de bombeo, de ahí entonces que a mayor tiempo de bombeo será también más grande el flujo de sustancia de trabajo. Se consideró entonces la variación linealmente entre el flujo y el tiempo de funcionamiento de las bombas para conocer el flujo correspondiente.

La consideración anterior entraña una diferencia con el valor real o un error que como máximo debe estar por debajo del 10%, siendo este valor del orden del error de medición de los flujómetros que deberían ser empleados, así como la variación de los factores antes descritos (fluido-rendimiento-presión) que su cambio es menor al 10% considerado. Esto es una salida ante el problema presente que brindará resultados finales cuya precisión será mejorable, pero permitirán caracterizar energéticamente el ciclo de vapor para cocción y el funcionamiento del generador de vapor a un nivel superior al actual que es casi ignorado.

Entonces, según los parámetros del fabricante y presiones de trabajo correspondientes, la eficiencia del generador de vapor ( $Nb_{\text{tiempo}}$ ) se puede calcular de la forma siguiente:

$$Nb_{\text{tiempo}} = [(Tb * D_{\text{nom}_b}) / (Tq * B_{\text{nom}_q})] * Nb_{\text{nom}} \quad (2.24)$$

Donde:

$Tb$ ,  $Tq$ : tiempos de bombeo de agua y de combustión del generador de vapor en un turno de trabajo respectivamente; horas.



$D_{nom\_b}$ ,  $B_{nom\_q}$ : flujos para capacidad nominal y estacionaria de los consumos de agua y petróleo respectivamente; kg/h

$Nb_{tiempo}$ : eficiencia bruta de operación de la caldera para capacidad nominal de trabajo; adimensional.

## **2.9 Índices de desempeño energético de la caldera de la cocina comedor universitaria**

En investigaciones anteriores realizadas por (Guerra Suarez, 2010) (Aguiar, 2017) (Gonzales Sanchez, 2019) (Cárdenas Vizcón, 2019) se propusieron índices de desempeño para el generador de vapor y el ciclo de cocción de alimentos mediante vapor. Estos fueron:

- Cantidad de raciones, tipo y masa de alimentos preparados por litro de petróleo gastado
- Cantidad de raciones, tipo y masa de alimentos preparados por litro de agua gastado
- Cálculo de la eficiencia del generador de vapor por el método aproximado de los tiempos de funcionamiento del quemador y la bomba.

El comportamiento de los consumos de petróleo para las necesidades de cocción de alimentos con los parámetros medidos durante la prueba termodinámica y del registro primario del área se calculó por tres ecuaciones, estas son:

- Raciones/kg de Petróleo:

$$I_{vc} = \text{raciones} / (B * T_q * 3600) \quad (2.25)$$

- kg de comida/kg de petróleo:

$$I_{cp} = \text{comidas} / (B * T_q * 3600) \quad (2.26)$$

Estos fueron calculados, pero no se dio seguimiento a los mismos por el área responsable de la universidad, quedando la imagen de un total desconocimiento desde el punto de vista tecnológico del funcionamiento y eficiencia de trabajo del área.

Al medirse el volumen de petróleo del tanque exterior de almacenamiento, los tiempos de funcionamiento de la bomba de agua y del quemador de petróleo, las mediciones con el analizador de gases y la medición de temperatura exterior de la caldera se crean condiciones de obtener resultados de mayor precisión.

## **2.10 Estimación del impacto ambiental por uso del petróleo en la caldera.**

La combustión del petróleo provoca emisiones de gases de efecto invernadero tales como el CO<sub>2</sub>, el CO, SO<sub>2</sub>, y los NO<sub>x</sub>. Estas emisiones deben ser absorbidas por los bosques y para ello existe una relación que calcula la llamada huella ecológica para atenuar estos daños.

La metodología propuesta por (Wackernabel & Rees, 2012) plantea que la huella ecológica se calcula según la relación de una hectárea (10<sup>4</sup> m<sup>2</sup>) boscosa que asume las emisiones de 100 Giga Joule (GJ) de energía, es decir unas 2,5 toneladas de combustible equivalente, en un año. Se considera combustible un petróleo cuyo valor calórico es 43,26 MJ/kg. También es posible estimar en dinero el daño ambiental provocado por la combustión de petróleo, según (Veziroglu, 1998), para los petróleos se estima que son 12,52 \$/(GJ.año) y según (Vizcón.etal, 2021) en Cuba para los petróleos se estima que son 1,71 \$/(GJ.año).

Para un año de trabajo de la caldera con un consumo medio anual de 1,99 toneladas para el mes de noviembre de 2021, así para el valor calórico del petróleo utilizado en los cálculos termodinámicos de VC=39,02 MJ/kg, serán 19,9 toneladas de combustible equivalente a consumir en el 2021 por la caldera.

- La huella ecológica (H\_ ecológica) se calculará por:

$$H_{\text{ecológica}} = Pca / Rh, \text{ (ha)} \quad (2.27)$$

Donde:

Pca: estimación del consumo de petróleo de la caldera en un año, (t)

Rh: relación de tonelada de combustible por hectáreas, (t/ha)

- El daño ambiental (D\_ ambiental) se calculará:

$$D_{\text{ambiental}} = Dacp * 0.001 * Pca * 1000 * VC, (\$/\text{año}) \quad (2.28)$$

Donde:

Dacp: estimado en dinero del daño ambiental al año, (\$/GJ. año)

VC: valor calórico del combustible, (MJ/kg)

## **2.11 Modelación experimental y procesamiento estadístico de las variables medidas y calculadas durante la prueba termotécnica de las calderas.**

El procesamiento estadístico se realizó a través del *software* “TK Solver”. Es un sistema de *software* de modelado matemático y resolución de problemas basado en un lenguaje declarativo basado en reglas, comercializado por (Universal Technical Systems, Inc., 2019).

## **2.12 Diagnóstico de recorrido del estado técnico y funcionamiento del generador de vapor y del proceso de transporte y uso del vapor.**

Según se sugiere por los métodos de “Gestión eficiente de energía” desarrollados por (Campos, et al., 2008) se deben realizar los diagnósticos iniciales de recorrido en las áreas que serán objeto de estudio. Al realizar los mismos se apreciarán problemas que requerirán de medidas técnico organizativas a implementar. Se detallarán problemas de instrumentación existente y faltante, equipos o instalaciones en mal estado, registros primarios de información y su rigor y conservación, así como la interrelación de trabajo entre las áreas de cocina-comedor, operador de caldera y el área de logística por el control del combustible gastado según los periodos de trabajo.

## CAPÍTULO III

### Capítulo III. Análisis y discusión de los resultados.

Una vez concluida las pruebas termotécnicas a la caldera #1 de la Universidad de Matanzas, se pudo calcular su rendimiento de operación y se determinó sus índices de desempeño energético. Fue posible la evaluación termodinámica de la caldera. A continuación, se analizan los principales resultados alcanzados que dan respuesta al objetivo general y objetivos específicos que determinan el cumplimiento de la hipótesis planteada de la investigación.

#### 3.1 Resultados de las mediciones de la prueba termotécnica al generador de vapor #1 de la Universidad de Matanzas.

Se consideró que el combustible es el petróleo crudo nacional mezclado del tipo PCM 1500 cuyo valor calórico bajo es  $VC=39,01$  MJ/kg, el cual es considerado como de alto contenido de azufre, esto tomado según datos de comercialización recibidos de la Comercializadora de Combustible de Matanzas para el año 2021.

A partir de las mediciones durante la prueba termotécnica de la caldera que se muestran a continuación:

*Tabla 3.1 Mediciones obtenidas durante las pruebas a calderas*

Inicio de medición	Tiempo encendido del quemador (horas)	Tiempo de bombeo de agua (horas)	Flujo de petróleo calculado kg/s	Presión de vapor (atm)	Presión de petróleo (atm)	Temperatura del petróleo (oC)	O <sub>2</sub> (%)	CO <sub>2</sub> (%)	CO (ppm)	T agua (oC)	T air (oC)	T gas (oC)
7:20 am	1,5	0,14	0,028	6,5	9,5	102	11,4	7,5	0,02	30	28	181

*Tabla 3.1.1 Resultados de la medición de temperatura exterior de la caldera*

TF °C	TT °C	TL °C	$TPm = \frac{TF * ATF + TT * ATT + TL * ATL}{ATF + ATT + ATL} \text{ °C}$
57	108,5	37,5	45,1

Se realizaron los cálculos de la eficiencia bruta de operación de la caldera #1 con la ayuda del software “TK Solver”, siendo los resultados reflejados en el Anexo 6 sobre corridas del programa. Los resultados tabulados se muestran a continuación:

*Tabla 3.1.2 Corrida del programa “TKSolver” de cálculo de eficiencia de caldera*

<i>Nb (%) Método directo</i>	<i>Nb1 (%) Método indirecto</i>	<i>Ex_GV (%) Eficiencia exergética</i>	<i>Error absoluto entre métodos de cálculo de eficiencia bruta de la caldera (Nb y Nb1) (%)</i>
85,3	90,4	70,5	5,9

Se puede apreciar que los valores calculados de la eficiencia por el método directo e indirecto difieren entre sí, al respecto se calcula el error relativo entre ambos métodos.

Se cumple según la primera ley de la termodinámica que el rendimiento exergético es siempre menor que los rendimientos energéticos.

*Tabla 3.1.3 Consumos de vapor de agua y petróleo.*

<i>Consumo diario de petróleo Pet_diario (kg)</i>	<i>Flujo de petróleo B (por el tiempo de trabajo de quemador y consumo promedio diario)</i>	<i>Dvs (kg/s)</i>	<i>Producción específica de vapor Dvs/B (kg vapor/kg petróleo)</i>	<i>Consumo diario de agua DV_diario (kg)</i>	<i>Consumo diario de petróleo por MJ de energía útil en el vapor producido (kg petróleo/MJ)</i>	<i>Producción de calor útil en el vapor por kg de petróleo consumido diariamente (MJ/kg pet)</i>
151,2	0,028	0,361	12,9	1950	0,029	34,05

### **3.2 Resultados del registro de raciones preparadas en un día de prueba y el consumo de combustible correspondiente.**

Los registros de la cocina-comedor sobre las raciones de comidas preparadas se muestran a continuación:

*Tabla 3.2 Registro de raciones de comidas preparadas por la cocina-comedor universitaria en un día de prueba de la caldera.*

<i>Raciones totales</i>	<i>Arroz (kg)</i>	<i>Frijoles (kg)</i>	<i>Viandas (kg)</i>	<i>Pescado, carne, huevo y pollo (kg)</i>	<i>Harina (kg)</i>
1150	86,3	27	155,4	66	10

*Tabla 3.2.1 Mediciones en tanque exterior de almacenamiento del petróleo y registro de raciones de comidas preparadas en un día.*

<i>Gasto de combustible medido en tanque Pet_diario (kg)</i>	<i>Total de raciones</i>	<i>Total de kg de comida</i>
151.2	1150	344,7

### **3.3 Cálculos de la eficiencia de operación de la caldera por el método de los tiempos de funcionamiento de quemador-bomba.**

*Tabla 3.3 Se midieron los tiempos de funcionamiento de la bomba y el quemador, los resultados fueron:*

<i>Eficiencia de caldera (Nb_tiempo)</i>	<i>Tiempo del quemador funcionando Tq (horas)</i>	<i>Tiempo de la bomba funcionando Tb (horas)</i>	<i>Error absoluto entre métodos de cálculo de eficiencia bruta de la caldera (Nb y Nb_tiempo) (%)</i>	<i>Error absoluto entre métodos de cálculo de eficiencia bruta de la caldera (Nb1 y Nb_tiempo) (%)</i>
81.9	1,5	0,14	3,9	9,8

Se puede apreciar que los valores calculados de la eficiencia por el método de los tiempos de funcionamiento de quemador-bomba difieren de los métodos de eficiencia directo e indirecto para lo cual se calculan los errores relativos entre dichos métodos.

### **3.4 Recomendaciones a partir del diagnóstico energético de la caldera #1 de la Universidad de Matanzas.**

Problemas detectados que deben ser resueltos por la UM:

1. Suavizador de agua sin funcionar.
2. Agua del sistema no tiene tratamiento químico y puede destruir los tubos de la caldera por sobrecalentamiento de los metales.
3. El consumo de combustible se mide semanalmente y no por turno diario de trabajo. Por ello se debe construir la regla graduada para el tanque de combustible pequeño ubicado dentro de la sala de caldera
4. No existen flujómetros para medir los consumos de agua y petróleo del generador de vapor.
5. Nunca se hace análisis de gases producto de la combustión (hacer análisis de gases una vez por semana, semanalmente o mensual).
6. Cambios bruscos de la temperatura de calentamiento del petróleo por fallas en el control.
7. No se cuantifica los gastos de agua y se sugiere calcular este por el tiempo de funcionamiento de la bomba y su capacidad.
8. La limpieza de la caldera por dentro de los tubos por los que circulan los gases y por fuera de ellos (Lavado) donde está el agua que evapora requieren de cumplimentar lo normado para las limpiezas. Por el lado de gases cada 6 meses y el lavado por el lado del agua y vapor cada tres meses al menos, para ambos casos de limpiezas.



9. No se tienen métodos para calcular la eficiencia de operación de la caldera ni se calculan índices de desempeño energético de la caldera

Propuestas de medidas para mejorar la eficiencia del generador de vapor:

1. Utilizar el retorno de los condensados de los consumidores de vapor con el objetivo de elevar la temperatura del agua de alimentación al generador.
2. Chequear rigurosamente el mantenimiento semanal y mensual del generador.
3. Valorar la utilización de magnetizadores para el agua de alimentación.
4. Restaurar el aislamiento térmico de tuberías que transportan el vapor hacia los consumidores y se encuentran en mal estado. Si conocemos que con un metro de tubería sin aislarse se perderían 2 105 kJ/h de energía y sería 449,87 kg. de combustible al año equivalente a 0,449 t/año (ALCION, 2009)
5. Chequear el estado técnico de algunas trampas de vapor por las cuales aparecen fugas o no funcionan correctamente.

### **3.5 Calculo de los índices de desempeño energético de la caldera en su función de generar vapor para cocción de alimentos.**

*Tabla 3.5 Índices de desempeño energético de la caldera*

<i>Petróleo consumido para cocinar raciones de comida (raciones/kg petróleo)</i>	<i>Petróleo consumido por kg de comida (comida/ kg petróleo)</i>
7,6	2,3

### **3.6 Cálculo de la huella ecológica por combustión de petróleo y de daño estimado del ambiente.**

*Tabla 3.6 Resultados de los cálculos de la huella ecológica y del daño del ambiente.*

<i>Huella ecológica (ha)</i>	<i>Daño ambiental</i>
7.96	1358.9

Es decir, sin tener en cuenta otros consumos de portadores energéticos en la UM que superan varias veces el consumo de petróleo en caldera, casi se requiere la mitad de la extensión total de la universidad sembrada por bosques para absorber todo el CO<sub>2</sub> generado por la caldera y no afectar el medio ambiente.

El daño anterior calculado en la actualidad toma valores superiores, por ejemplo para Cuba con datos de cierre anual 2016 de la oficina nacional de estadística (ONE) se pudo estimar (Vizcón Toledo, 2017) que el daño ascendió a 22,64 \$/GJ.año, es decir ha crecido 1,81 veces el daño ambiental estimado.

## CONCLUSIONES

1. A partir de acometer la solución del problema de investigación planteado relativo a la determinación de los índices de desempeño energético de las calderas y el servicio de vapor que prestan, se realizaron pruebas termotécnicas y se organizaron los registros de datos primarios existentes todo lo cual permitió caracterizar energéticamente el funcionamiento de la instalación en su conjunto. El cumplimiento de la hipótesis permitió cumplimentar el objetivo general y objetivos específicos de la tesis.
2. Se logró poner en funcionamiento el analizador portátil de la combustión con medición directa del CO<sub>2</sub> Kane 455 así como se tradujo y esclareció su manual de operación, el equipo está en perfectas condiciones. Se realizan 9 recomendaciones para mejorar el funcionamiento del sistema estudiado lo que también fortalecerá el trabajo seguro de la caldera.
3. Se caracterizaron los índices de desempeño energético de la caldera por día de trabajo, a saber, la eficiencia de la caldera (81-89,1) %, los consumos de petróleo expresados como (7.6) [raciones/kg. Petróleo] y de agua (1950) [kg. Agua/día].
4. El análisis de impacto ambiental realizado permitió expresar que la caldera universitaria en su funcionamiento genera la necesidad de cubrir una huella ecológica de 7,96 hectáreas (ha), la cual es comparable con la extensión de la UM en su sede “Camilo Cienfuegos” y también se determinó para las condiciones de Cuba (con referencia del año 2016).

## **RECOMENDACIONES**

1. Se deben cumplir las recomendaciones dadas en el presente trabajo de diploma por parte de la UM para lograr un mejor trabajo y con mayor seguridad en el área de generación y uso del vapor de la cocina-comedor.
2. Deben llevarse los controles en una sola área de la UM del gasto semanal de combustible, agua y raciones de comida con sus respectivas cantidades por tipos de alimentos para poder controlar la eficiencia energética del sistema

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdelaziz, . E., Mekhilef, S. & Saidur, R., 2010. *A review on energy saving strategies in industrial sector.* s.l.:s.n.

Agencia Internacional de Energía, AIE , 2019. *World energy Outlook 2019.* [Online]  
Available at: <http://bcn.cl/2f4ns>  
[Accessed noviembre 2021].

Abas, N., Kalair, A. & Khan, N., 2015. *Review of Fossil Fuels and Future Energy Technologies.* s.l.:s.n.

Aguiar, R. M., 2017. *Trabajo de diploma: Propuesta de indicadores de control del consumo de gasolina, diésel, petróleo y gas licuado en la Universidad de Matanzas.* Matanzas: s.n.

ALCION, 2009. [Online]  
Available at:  
<http://www.alcion.es/DOWNLOAD/ArticulosPDF/iq/gratis/05articulo.pdf>  
[Accessed 3 noviembre 2021].

Altomonte, H., Coviello, M. & Wolfgang, F., 2003. *Energías renovables y eficiencia energética en América Latina y el Caribe. Restricciones y perspectivas.* Santiago de Chile: División de recursos naturales e infraestructura.

Anon., n.d. *ENERGY PERFORMANCE ASSESSMENT OF BOILERS.* [Online]  
Available at: [www.boiler.com](http://www.boiler.com)  
[Accessed 1 noviembre 2021].

ATECYR, 2017. *Guía técnica sobre procesamiento de inspección periódica de eficiencia energética para calderas. En IDAE, Ahorro y Eficiencia Energética en Climatización.* [Online]  
Available at: <http://www.idae.es>  
[Accessed 2 noviembre 2021].

- Borroto Nordelo, A. & Rubio Gonzáles, Á., 2017. “*Combustión y Generación de Vapor*”. Cienfuegos: Editorial Universo Sur, 2017.
- BOSCH, 2012. *Tecnología en calderas industriales. Lo que todos debemos saber*. s.l.:Santiago Robert Bosch S.A..
- Bosh Santiago, R., 2012. *Tecnología en calderas industriales. Loque todos debemos saber*. [Online]  
Available at: <https://www.boshclimate.cl>  
[Accessed 2 noviembre 2021].
- Campos, J., Santos, L. & Gómez, R., 2008. *La eficiencia energética en la Gestión Empresarial*. Cienfuegos: Universidad de Cienfuegos.
- Cardenas Vizcón, F., 2019. *Tesis de grado: Diagnóstico Termodinámico para el desempeño energético del Generador de Vapor de la Universidad de Matanzas*. Matanzas, Cuba: 2019.
- Cengel, Y. & Boles, M., 2014. *Termodinámica*. México: Mc Graw Hill octava edición,2014.
- Consejo de Estado de la República de Cuba, 2015. *Programa nacional de desarrollo económico y social cubano hasta el año 2030*. La Habana, Cuba: s.n.
- Contaminación Ambiental, 2009. [Online]  
Available at: <http://cecaedesu.semarnat.gob.mx>  
[Accessed 3 noviembre 2021].
- Eberhard, F., 2012. *Comparativa de caldera pirotubular y caldera acuotubular*. [Online]  
Available at: <https://www.boschindustrial.com>  
[Accessed 2 noviembre 2021].
- Ellaban, O., Abu-Rub, H. & Blaabjerg, F., 2014. *Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology*. s.l.:2014.

- Empresa: TECNİK LTDA, 2012. *Caldera igneotubulares*. [Online] Available at: <http://www.tecnik.com.co> [Accessed 2 noviembre 2021].
- Enfoque Isotérmico de Problemas Ambientales, 2009. *Restauración de equilibrios dinámicos en ecosistemas dominados por el hombre*. [Online] Available at: <http://cecaedu.semart.gob.mx> [Accessed 3 noviembre 2021].
- Engineering, University of Surrey of Department of Chemical & Process, 2010. "The Process Heat Transfer and Multiphase Operations Group".
- Ferrari, L., 2013. *Energías fósiles: diagnóstico, perspectivas e implicaciones económicas*. México: Revista Mexicana de Física.
- Gaceta Oficial de la República de Cuba GOC, 2019. *Decreto-Ley No.345 "Del desarrollo de la fuentes renovables y el uso eficiente de la energía"*. La Habana: GOC.
- Golato, M. A. et al., 2008. *Metodología de cálculo de la eficiencia térmica de generadores de vapor*. [Online] Available at: <http://www.scielo.org.ar> [Accessed 3 noviembre 2021].
- Gonzales Sanchez, M., 2019. *Trabajo de diploma: Analisis de los indicadores de desempeño energetico segun la norma ISO 50001*. Matanzas: 2019.
- Gonzales, Á. R., 2000. *Generadores de Vapor. Funcionamiento y Explotacion*. Santa Clara: s.n.
- Guerra Suarez, A., 2010. *Trabajo de diploma: Metodología para la obtención de los índices de consumo y la explotación más eficiente en el generador de vapor de la Universidad*. Matanzas: 2010.

- Industria petrolera, 2009. *Determinación de la gravedad api del petróleo*. [Online] Available at: <http://industria-petrolera.blogspot.com> [Accessed 5 noviembre 2021].
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, IDEA, 1988. *Uso de la energía en calderas y redes de fluido*. s.l.:s.n.
- Jaiswal, K., 2015. *Study about efficiency improvement of thermal power plant&advance technologies in different types of plants*. India: 2015.
- Jiménez Borges, R., 2015. Method for evaluating the efficiency and environmental impact of a steam generation.
- Kotas, T., 2012. *The Exergy Method of thermal plant analysis*. London: LDN: Exergon Publishing Company UK Ltd.
- Lapido Rodríguez, M. J., Vidal Moya, D. A. & Madrigal Monzón, J. A., 2015. *Funcionamiento y pérdidas en calderas pirotubulares "Estudio de casos"*. Cienfuegos: Universo Sur,2015.
- Lozano, M. A. & A., 1986. *Evaluación de los rendimientos energéticos y exergéticos de calderas de vapor por pérdidas separadas*. Escuela Tecnica Superior de Ingenieros Industriales ed. s.l.:Revista Energia.
- Manual de Instrucción para analizador de gases para dióxido de carbono, 1993.
- Manual de uso eficiente de la energía en calderas y redes de fluido. Operación de caldera* (n.d.).
- Mikhryev, M., 1968. *Fundamentals of heat transfer*. s.l.:Edit. MIR/Moscú pág.207.
- Norma ISO 50001, 2018. *Energy Management Systems*. [Online] Available at: <http://www.iso.org/iso/home/standards/management-standards/iso50001.htm>



- Normalización, O. N. D., 2011. *Sistemas de gestión de la energía-Requisitos con orientación*. s.l.:s.n.
- Pérez Garay, L., 1986. *Generadores de vapor*. La Habana: Editorial: Pueblo y Educación, 1986.
- Protocolo de Kyoto, 2009. *Medidas para mitigar el cambio climático*. [Online] Available at: <http://www.dur.ac.uk> [Accessed 4 noviembre 2021].
- Rodríguez Palmero, B., 2005. *Estudio de los Portadores Energéticos en los CES de Cuba .Tesis presentada en Opción al Grado Académico de: Master en Ciencias técnicas*. Santa Clara, Cuba: UCLV.
- Rubio Gonzales, Á. M., 2015. *Generadores de Vapor. Funcionamiento y explotación*. Santa Clara: Editorial Feijoo, 2015.
- Steeep, 2020. *Energy efficiency performance*. s.l.:Co\_funded by the inteligent Energy Europe.
- Suárez Hernández, E., 2009. *Análisis y Evaluación del Nuevo Generador de Vapor con un quemador adaptado en la Pasteurizadora de Placetas*. La Habana: s.n.
- Tanquero Díaz, N., 2002. *Curso de Generadores de Vapor*. Puerto Ordaz, venezuela: s.n.
- Uceda Martinez, J., 2012. *Guía Básica de Calderas industriales Eficientes*. Móstoles, Madrid: Consejería de Economía y Hacienda. Comunidad de Madrid.
- Universal Technical Systems, Inc., 2019. *TK Solver 6 User's Guide*. 4053 North Perryville Road, Loves Park, Illinois 61111: First edition printed in August 1994 in the U.S.A..
- Veziroglu, T. N., 1998. *Proceedings of the 12th WHEC, International Association for Hydrogen Energy*. Coral Gables, Florida: 1998.

Vizcón Toledo, R., 1997. *Tesis Doctoral: Determinación de los coeficientes de efectividad calórica de los sobrecalentadores de vapor convectivos de calderas bagaceras*. Habana: 1997.

Vizcón Toledo, R., 2017. *Curso de maestría de producción más limpia: Energía y medio ambiente*. Matanzas, Cuba: 2017.

Vizcón.etal, 2021. ESTIMACIÓN ECONÓMICA DEL DAÑO AMBIENTAL QUE PROVOCA EL USO DE COMBUSTIBLES FÓSILES. *evento científico internacional CIUM 2021*.

Wackernabel, M. & Rees, W., 2012. *Nuestra huella ecológica: "Reduciendo el impacto humano sobre la tierra"*. s.l.:2012.

Wackernagel, M. & Roes, W., 2012. *Nuestra huella ecológica: "Reduciendo el impacto humano en la Tierra"*. s.l.:2012.

## ANEXOS

### Anexo 1: Manual del analizador portátil de la combustión con medición directa del CO<sub>2</sub> Kane 455.



**Anexo 2: Termómetro infrarrojo UNI-T modelo UT305A/B/C y UT306A/B/C**



**Anexo 3: Caldera No.1 de la Universidad de Matanzas objeto de estudio**



Datos de chapa de la caldera:



Quemador en la pared frontal de la caldera:



Datos de chapa del quemador:



Pared lateral de la caldera:



Pared trasera de la caldera y válvula de protección:





Chimenea de la caldera:



Bombas de agua dentro de la casa de calderas:



Datos de chapa de bomba de Agua dentro de la casa de calderas:



Anexo 4: Foto del Tanque de agua fuera de la casa de calderas.



**Anexo 5: Fotos tomadas en el período de pruebas dentro de la casa de calderas**

Tomando mediciones en el área de las bombas de agua:



Tomando mediciones de temperatura en la pared lateral de la caldera:



**Anexo 6: Corridas de software TK Solver para cálculos de índices energéticos del Generador de vapor de la Universidad Camilo Cienfuegos.**

<b>Rule</b>
$B = Qu / (Qd * Nb) * 100$
$Qu = Dvs * (ivs - ia) / 1000$
$Qd = Qbc + Qpca + Qat + Qfc$
$Nb1 = 100 - (q2 + q3 + q4 + q5 + q6 + q7)$
$q2 = (Q2 / Qd) * 100$
$Q2 = (igs - ags * iaf) * (100 - q4) / 100$
$q3 = (Q3 / Qd) * (100 - q4)$
$q3 = (60 * (CO) / (CO2 + CO)) * (100 - q4) / 100$
$igs = Cgs * Vgs * tgs$
$q4 = 100 * (Q4 / Qd)$
$q5 = (Q5 / Qd) * (100 - q4)$
$Q5 = (alfaConv * TPm * ATgv) * B$
$ATgv = ATF + ATT + ATL$
$TPm = (ATF * TF + ATT * TT + ATL * TL) / ATgv$
$alfaConv = (8.4 + 0.06 * (TPm - tair)) / 860$
$Nb\_tiempo = ((Tb * D\_nom\_b) / (Tq * B\_nom\_q)) * ((Nb1 + Nb) / 2) ;$
$Error = ABS(Nb - Nb\_tiempo) * 2 * 100 / (Nb + Nb\_tiempo)$
$Error1 = ABS(Nb1 - Nb\_tiempo) * 2 * 100 / (Nb1 + Nb\_tiempo)$
$Error3 = ABS(Nb - Nb1) * 2 * 100 / (Nb + Nb1)$
$sa = \$ENTROPY(1, 'water', 'T, T, 'P, P)$
$ia = \$ENTHALPY(1, 'water', 'T, T, 'P, P)$
$Tv = \$SATTEMP(1, 'water', 'P, P)$
$ivs = \$ENTHALPY(1, 'water', 'X, X, 'P, P)$
$svs = \$ENTROPY(1, 'water', 'T, Tv, 'P, P)$
$Qfc = Cp * tc$
$Cp = 1.738 + 0.0025 * tc$
$T = 273 + ta$
$P = Pv + 100000$
$Ivp = Dvs / B$
$Ipv = Pet\_diario * 10^6 / (DV\_diario * (ivs - ia))$
$Ivc = raciones / (B * Tq * 3600)$
$Icp = comidas / (B * Tq * 3600)$
$\#BHP = Qu / 9.8$

$Pet\_diario=B*Tq*3600$
$DV\_diario=Pet\_diario*Ivp$
$Ipq=1/Ipv$
$Ex\_GV=100*Ex\_util/Ex\_pet$
$Ex\_util=Dvs*((ivs-ia)-(tair+273)*(svs-sa))$
$Ex\_pet=K*Qd*B*1000$
$H\_ecologica=Pca/Rh$
$D\_ambiental=Dacp*0.001*Pca*1000*VC$

Statu s	Input	Name	Output	Unit	Comment
	.028	B		kg/s	flujo de combustible gastado por la caldera
		Qu	953.28138793613	kW	flujo de calor útil producido por la caldera
		Qd	39932.606	kJ/kg	calor disponible del petróleo a transferir por la caldera
		Nb	85.2580566739415	%	eficiencia del GV por método directo
		ivs	2765643.40540493	J/kg	entalpia del vapor generado por la caldera
		ia	125787.254197182	J/kg	entalpia del agua que entra a la caldera
	.361111111111111111	Dvs		kg/s	flujo de vapor producido por la caldera
	39729.32	Qbc		kJ/kg	calor especifico de combustión del petróleo
	0	Qpca		kJ/kg	Calor suministrado si hay precalentamiento de aire para

					combustión		
0		Qat			kJ/kg	Calor suministrado si atomización del petróleo con vapor para combustión	
		Qfc	203.286			kJ/kg	Calor suministrado por calentamiento sensible previo del petróleo para combustión
		q2	7.509729016934 18		%		perdida de calor con gases calientes (humos) de salida de la caldera
		q3	1.550649350649 35		%		perdida de calor por incombustión química del petróleo
.5		q4			%		perdida de calor por incombustión mecánica (inquemados) del petróleo
		q5	.0020320096615 572		%		perdida de calor por superficies exteriores calientes
0		q6			%		perdida de calor por cenizas calientes de escape o en depósitos interiores
0		q7			%		perdida de calor por purgas

					continuas de agua caliente
		Q2	2998.8305	kJ/kg	perdida de calor por gases calientes de salida o escape por chimenea
		igs	3058.9	kJ/kg	entalpía de los gases de salida por chimenea
	1.5	ags		-	coeficiente de exceso de aire en los gases de salida de la caldera
	30	iaf		kJ/kg	entalpía del aire atmosférico para combustión
		Q3	622.3263272727	kJ/kg	perdida de calor por incombustión química del petróleo
	1.3	Cgs		kJ/(m <sup>3</sup> *oC)	calor especifico de los gases de salida de la caldera
	13	Vgs		m <sup>3</sup> /kg	volumen de los gases de salida de la caldera
	181	tgs		oC	temperatura de los gases de salida de la caldera
		Q4	199.66303	kJ/kg	perdida de calor por combustible no quemado
		Q5	.815511971891025	kJ/kg	perdida de calor por superficies exteriores calientes
		alfaConv	.0109613179610692	kW/ (m <sup>2</sup> .oC)	coeficiente de termotransferen



					cia de calor de superficies exteriores calientes
		TPm	45.1122241086587	oC	temperatura media de las paredes exteriores calculada
		ATgv	58.9	m2	superficie total de la caldera
4.9		ATF		m2	superficie de la pared frontal de la caldera
4.9		ATT		m2	superficie de la pared trasera de la caldera
49.1		ATL		m2	superficie de la pared lateral de la caldera
57		TF		oC	temperatura medida de la pared frontal de la caldera
108.5		TT		oC	temperatura medida de la pared trasera de la caldera
37.6		TL		oC	temperatura medida de la pared lateral (evolvente) de la caldera
		Nb_tiempo	81.991301605125	%	eficiencia del GV por método tiempos de quemador-bomba
		Error	3.90644855374061	%	error absoluto entre métodos de cálculo de eficiencia bruta de la caldera (Nb y

					Nb_tiempo)
L	.2	CO		%	contenido volumétrico de CO medido por el analizador Kane
	7.5	CO2		%	contenido volumétrico de CO2 medido por el analizador Kane
		Nb1	90.43758962275 49	%	eficiencia del GV por método indirecto
	.14	Tb		h	tiempo de trabajo de la bomba introduciendo agua a la caldera
	1500	D_nom_b		kg/h	flujo de vapor de diseño (según fabricante) de la caldera
	1.5	Tq		h	tiempo de trabajo del quemador en funcionamiento
	150	B_nom_q		kg/h	flujo de petróleo de diseño (según fabricante) de la caldera
		T	303	K	temperatura del agua de entrada a la caldera
	30	ta		oC	temperatura del agua de entrada a la caldera
		P	750000	Pa	presión absoluta del vapor generado por la caldera

	650000	Pv		Pa	presión manométrica del vapor generado por la caldera
		Tv	440.898559229753	K	temperatura del vapor generado por la caldera
	1	X		-	calidad del vapor generado por la caldera
	102	tc		oC	temperatura de calentamiento del petróleo
		Cp	1.993	kJ/(kg.oC)	calor específico del petróleo
		Error1	9.79683620010916	%	error absoluto entre métodos de cálculo de eficiencia bruta de la caldera (Nb1 y Nb_tiempo)
		lvp	12.8968253968254	kg vapor/kg petróleo	índice de kg vapor producido por kg de petróleo
		lvc	7.60582010582011	raciones/kg petróleo	índice de petróleo consumido para cocinar raciones de comida
	1150	raciones		raciones	cantidad de raciones de comida
		lvp	.0293722298099415	kg petróleo/MJ	índice de consumo diario de petróleo por MJ de energía útil en el vapor producido
		#BHP	97.2736110138908	BHP	capacidad de trabajo de la caldera

					expresada en BHP (1 BHP es 9,8 kW)
		Pet_diario	151.2	kg petróleo	consumo diario de petróleo en la caldera de vapor
		DV_diario	1950	kg agua	consumo diario de agua (o entrega de vapor ) de la caldera
		lpq	34.0457638548618	MJ/kg pet	producción de calor útil en el vapor por kg de petróleo consumido diariamente
28		tair		oC	temperatura aire ambiente
		lcp	2.2797619047619	kg comida/kg petróleo	índice de petróleo consumido por kg de comida
344.7		comidas		kg	cantidad de kg de comida
		Error3	5.8960287952346	%	error absoluto entre métodos de cálculo de eficiencia bruta de la caldera (Nb y Nb1)
		Ex_GV	70.5552262124266	%	rendimiento exergético del generador de vapor
		Ex_util	780998.262544049	W	exergía útil con el vapor producido
		Ex_pet	1106931.83832	W	exergía del petróleo
		svs	2019.48201238178	J/kg.K	entropía del vapor que sale de la caldera

		sa	434.4596474150 24	J/kg.K	entropía del agua de entrada a la caldera
.99		K		-	coeficiente de equivalencia exergética del combustible
		H_ecológica	7.96	ha	huella ecológica
19.9		Pca		t	estimación del consumo de petróleo de la caldera en un año
2.5		Rh		t/ha	relación de tonelada de combustible por hectáreas
		D_ambiental	1358.8715	\$/año	daño ambiental
1.75		Dacp		\$/GJ.año	estimado en dinero del daño ambiental al año
39.02		VC		MJ/kg	valor calórico del combustible