

UNIVERSIDAD DE MATANZAS
FACULTAD DE CIENCIAS TÉCNICAS
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA



**ESTUDIO DE LAS EMISIONES DE LA CENTRAL TERMOELÉCTRICA LIDIO
RAMÓN PÉREZ Y SU IMPACTO AMBIENTAL**

Trabajo de diploma presentado en opción al título de Ingeniero Mecánico.

Autor: ANDY GARCÍA GINORIS

Tutor: Prof. Asist., Ing. Yanán Camaraza Medina, M.Sc., Dr.C.

Cotutor: Prof.Tit., Ing. Roberto Vizcón Toledo. 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 Camilo Cienfuegos a darle el uso que estime más conveniente.

Andy García Ginoris

RESUMEN

En la actualidad, en la CTE Lidio Ramón Pérez (Felton), se utiliza petróleo crudo como combustible, el cual, al ser quemado bajo condiciones deficientes, libera un alto contenido de azufre y otros gases de efecto invernadero a la atmósfera, contribuyendo así al calentamiento global. La CTE no dispone de un estudio de huella ecológica que relacione las emisiones con su impacto ambiental. En este trabajo de diploma se reúne la información necesaria para realizar un estudio de huella ecológica en la CTE a partir de la evaluación de los indicadores de eficiencia energética en el generador de vapor por los métodos directo e indirecto. Además, se calcula el monto financiero por emisiones de gases de efecto invernadero a través de la metodología de Camaraza. Fue revisado el estado del arte sobre el tema, caracterizando los fundamentos teóricos requeridos para llevar a cabo el cálculo de eficiencia del generador de vapor y de huella ecológica. El monto financiero por emisiones de gases resultó ser de 2,725 MUSD/año.

ABSTRACT

At the present time, in the Thermal Power Plant Lidio Ramón Pérez (Felton), crude oil is used as fuel, which, when burned under poor conditions, releases a high sulfur content into the atmosphere, thus contributing to global warming. The TPP does not have an ecological trace study that relates emissions to their environmental impact. In this thesis, the necessary information is gathered to carry out an ecological trace study in the TPP from the evaluation of the energy efficiency indicators in the steam generator by direct and indirect methods. In addition, the financial amount for greenhouse gas emissions is calculated through the Camaraza's methodology. The state of the art on the subject was reviewed, characterizing the theoretical foundations required to carry out the calculation of the efficiency of the steam generator and the ecological footprint. The financial amount for gas emissions turned out to be 2,725 MUSD / year.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I ESTADO DEL ARTE SOBRE EL ANÁLISIS DE HUELLA ECOLÓGICA.....	4
1.1 Introducción.	4
1.2 Centrales Termoeléctricas	4
1.2.1 Tipos de Centrales Termoeléctricas	4
1.2.3 Generador de Vapor	5
1.3 Tipos fundamentales de combustibles en Cuba.	6
1.4 Contaminación	7
1.4.1 Contaminación en Cuba	8
1.5 Huella ecológica.....	10
CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS REQUERIDOS PARA EL CÁLCULO DE LOS INDICADORES DE EFICIENCIA DEL GENERADOR DE VAPOR.	13
2.1 Breve descripción de la entidad y de las condiciones primarias de estudio.....	13
2.2 Eficiencia en el generador de vapor.	13
2.2.1 Método directo.	13
2.2.2 Método Indirecto.....	15
2.3 Parámetros de operación del generador de vapor.....	18
2.4 Metodologías para el cálculo del costo del impacto ambiental	20
2.4.1 Método de Veziroglu	20
2.4.2 Método de Ocañas.....	23
2.4.3 Método de Vizcón.....	23
2.4.4 Método de Camaraza:.....	24
CAPÍTULO III. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	26
3.1 Generalidades.....	26
3.2 Volumen de aire, gases y exceso de aire.	26
3.3 Entalpías y flujos de gas y aire	27
3.4 Pérdidas de calor y eficiencia térmica por método indirecto.	27

3.5 Pérdidas de calor y eficiencia térmica por método directo.	28
3.6 Eficiencia térmica del generador de vapor.	29
3.7 Índice de generación de vapor y consumo específico de combustible.	30
3.8 Monto financiero del daño ambiental por emisiones de GEI.	33
CONCLUSIONES	34
RECOMENDACIONES	35
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	36

INTRODUCCIÓN

Desde su descubrimiento, la energía eléctrica ha formado parte inseparable del desarrollo del hombre. En la actualidad cada proceso, desde uno simple hasta el más sofisticado, necesita electricidad para ser llevado a cabo. Una de las formas principales para obtener energía eléctrica (la fundamental en Cuba) es a través de Centrales Termoeléctricas (CTE) cuya función no es más que generar electricidad a partir de la energía liberada por combustibles fósiles [1].

Las llamadas centrales clásicas o de ciclo convencional no son más que aquellas que emplean la combustión del carbón, petróleo (aceite) o gas natural para generar energía. Estas se consideran más económicas debido a que su utilización es extendida desde los países más avanzados hasta los que están en vías de desarrollo aunque su impacto ambiental es muy elevado debido al uso de los combustibles fósiles antes mencionados [2]. El funcionamiento de una CTE convencional es el mismo independientemente del combustible que consume [3]. Este combustiona en un generador de vapor, liberando el calor que se emplea para calentar el agua. El agua calentada a altas temperaturas se convierte en vapor con una presión elevada y este hace girar una turbina de vapor, lo que transformará la energía interna del vapor en energía mecánica. La energía eléctrica se produce en un alternador, mediante el rotor que comparte el mismo eje con la turbina y mediante inducción electromagnética. La electricidad generada pasa por un transformador que aumenta su tensión para el transporte y el vapor que sale de la turbina se envía a un condensador para transformarlo en líquido y reenviarlo a la caldera para comenzar el ciclo de nuevo [4].

Actualmente se construyen numerosas CTE denominadas de ciclo combinado que utilizan gas natural, gasóleo (diesel) o incluso carbón preparado como combustible para alimentar una turbina de gas. Los gases de escape de esta aún tienen una elevada temperatura y se utilizan para producir vapor y mover una segunda turbina. Cada una de las turbinas esta acoplada a un alternador para la generación de electricidad [5].

Cuando se usan combustibles fósiles se libera dióxido de carbono (CO_2) a la atmósfera, gas que, junto al vapor de agua (H_2O), metano (CH_4), óxido de nitrógeno (N_2O) y los clorofluorocarbonos (CFC), contribuye al efecto invernadero, que es uno de los principales problemas ambientales que azota a la humanidad hoy en día. Estas sustancias anteriormente mencionadas son llamadas gases de efecto invernadero (GEI) [6]. El efecto invernadero es el proceso en el que la radiación térmica emitida por la superficie del planeta es absorbida por los GEI atmosféricos y es irradiada hacia todas las direcciones.

Se debe considerar que la masa de gas emitida por unidad de energía producida no es la misma en todos los casos. El carbón está compuesto por carbono e impurezas y, al ser quemado, casi todo el carbono se convierte en dióxido de carbono y si la combustión es pobre en oxígeno, en monóxido de carbono. Con el gas natural por cada átomo de carbono hay cuatro de hidrógeno que produce energía al unirse con oxígeno para convertirse en agua, por lo que contaminan menos por cada unidad de energía [7].

Las plantas termoeléctricas son consideradas importantes fuentes de emisiones atmosféricas que consecuentemente pueden afectar el área local que ocupan o la región en sí. Los procesos de combustión de las termoeléctricas emiten dióxido de azufre (SO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono y partículas que pueden contener metales menores. La cantidad de residuo expulsada en el proceso dependerá del tipo y la calidad del combustible y de cómo se queme el mismo, además del tamaño y tipo de instalación [8].

Cuba no está exenta en el tema. Las termoeléctricas que operan en el territorio nacional, en su mayoría, utilizan crudo con altos contenidos de azufre, lo que es altamente negativo para el ambiente por el gran contenido de dióxido de azufre que se emite, además de óxidos de carbono [9].

Se puede apreciar que el problema de la contaminación atmosférica en las CTE es máximo dado que los combustibles quemados, en mayor o menor medida, afectan fuertemente la atmósfera y ha repercutido en el crecimiento de la huella ecológica mundial [8-9].

La huella ecológica constituye un indicador de sustentabilidad creado por William Rees y Malthis Wackernagel a mediados de los 90's para conocer el nivel de impacto que tiene una comunidad, persona, entidad, organización, país, o región sobre el medio ambiente. No es más que un sistema de contabilidad ecológica que muestra las consecuencias de actividades

y acciones en el planeta y expresa en hectáreas globales (hag) cuanto espacio marino y terrestre se necesita para abastecer dichas actividades, así como la superficie para absorber todos los desechos generados [10].

Últimamente en el mundo se ha desarrollado una tecnología llamada Gasificación Integrada en Ciclo Combinado (GICC) que trata sobre transformar el carbón en gas (gas de síntesis) para ser aprovechado en un ciclo combinado. Para reducir las emisiones de CO₂ se pueden incorporar a la central la tecnología de captura del mismo (captura en postcombustión, precombustión y oxidación). Esta tecnología reduce considerablemente las emisiones aunque suele ser muy cara [11].

En la actualidad, la CTE Lidio Ramón Pérez, utiliza como combustible crudo de petróleo, el cual, al ser quemado bajo condiciones deficientes, libera un alto contenido de azufre a la atmósfera, contribuyendo así al calentamiento global. Esto provoca también un crecimiento en la huella ecológica que esta entidad posee debido a un mayor consumo de las materias primas necesarias por falta de eficiencia.

Por lo tanto, la realización del presente trabajo de diploma se enfrenta al siguiente **problema científico:** *En la actualidad no se dispone de un estudio de huella ecológica que relacione las emisiones de la CTE Felton con su impacto ambiental.*

Por lo tanto, en este trabajo se persigue el siguiente **objetivo general:** *Presentar un estudio de huella ecológica de la CTE Felton a partir de la evaluación de los indicadores de eficiencia energética en el generador de vapor.*

Los elementos planteados permiten establecer la siguiente **hipótesis:** *Si se realiza un análisis de los indicadores de eficiencia del generador de vapor de la CTE de Felton se puede establecer un estudio de huella ecológica de la operación de la misma sobre el medio ambiente*

CAPÍTULO I ESTADO DEL ARTE SOBRE EL ANÁLISIS DE HUELLA ECOLÓGICA.

1.1 Introducción.

Desde su descubrimiento, la energía eléctrica ha formado parte inseparable del desarrollo del hombre. En la actualidad cada proceso, desde uno simple hasta el más sofisticado, necesita electricidad para ser llevado a cabo. Una de las formas principales para obtener energía eléctrica (la fundamental en Cuba) es a través de Centrales Termoeléctricas (CTE) cuya función no es más que generar electricidad a partir de la energía liberada por combustibles fósiles [12].

1.2 Centrales Termoeléctricas

Una central termoeléctrica es una instalación en donde a partir de energía mecánica se genera electricidad usando carbón, petróleo o gas natural como combustible. Dichas centrales se componen de un generador de vapor y de una turbina que mueve el generador eléctrico. Sin importar mayormente cual sea el tipo de combustible que utilicen, el funcionamiento es casi el mismo, salvo por pequeñas diferencias en el tratamiento previo que sufre el combustible antes de ser ingresado al generador de vapor, el cual es el elemento fundamental ya que en él se produce la quema del combustible usado. La energía obtenida en el proceso anterior se emplea para hacer la transformación del agua en vapor. El vapor generado tiene una gran presión, y se hace llegar a las turbinas para que en su expansión sea capaz de mover los álabes de las mismas, produciendo así la energía mecánica suficiente para hacer girar al rotor del generador y obtener energía eléctrica [13]. De igual manera, el diseño interno y tipo de turbina generadora ha de variar dependiendo del combustible fósil que se emplee.

1.2.1 Tipos de Centrales Termoeléctricas

Las CTE se pueden clasificar atendiendo al tipo de combustible utilizado, teniéndose tres tipos fundamentales, las cuales son:

1- **Gas natural y ciclo combinado:** Utilizan como combustible para la generación gas natural, petróleo o carbón para entrar en funcionamiento una turbina de gas. Luego, los gases sobrantes de este proceso son utilizados para mover una segunda turbina, esta vez mediante el uso de vapor. Esto se debe a que el vapor es enfriado en un equipo de condensación y convertido otra vez en agua, iniciando así, un nuevo ciclo. Cada turbinas existente en el ciclo de generación está conectada a un equipo alternador que independientemente genera su propia energía eléctrica [14].

2- **Carbón:** Son centrales donde su fuente combustible nace del carbón, el que en una primera fase es triturado molinos para luego ingresar a la caldera central. De ahí en adelante el sistema funciona de manera similar a las centrales hidroeléctricas, valiéndose de la fuerza motriz que expelle el vapor para el movimiento de una turbina, que posteriormente ha de producir energía eléctrica. Es importante notar que una central termoeléctrica a carbón tiene un costo de operación más bajo que una de gas natural o de diesel [15].

3- **Fuel:** Este tipo de centrales funcionan de manera similar a las de carbón. Al ingresar el combustible es precalentado para licuarlo y así poder utilizarlo de manera más óptima, siendo quemado posteriormente. El vapor generado en el proceso entra en las turbinas para hacer girar la estructura que produce energía mecánica, la cual será transformada en energía eléctrica al final del proceso [16].

1.2.3 Generador de Vapor

El generador de vapor tiene la función de transferir al agua, la energía en forma de calor de los gases producto de la combustión de la sustancia combustible, para que esta se convierta en vapor. Este equipo, que tuvo prácticamente su origen con el surgimiento de la máquina de vaporen la época de la revolución industrial, se ha desarrollado vertiginosamente y en la actualidad se encuentra altamente especializado en su función.

Al generador de vapor lo componen diferentes partes, algunas de las cuales tienen funciones específicas, imprescindibles para su funcionamiento y otras cuya misión es la de aumentar la eficiencia de la recuperación del calor desprendido y contribuir, de paso, al funcionamiento correcto del generador de vapor. En dicho funcionamiento tiene gran importancia el movimiento de los gases portadores del calor, desde el horno donde se

producen hasta la chimenea que loexpulsaal medio ambiente; durante este recorrido se ponen en contacto con las superficies de transferencia de calor.

Por otra parte, el movimiento del agua y de la mezcla agua-vapor que se crea producto de laaceptación de calor, reviste también singular interés en el funcionamiento del generador de vapor. Este movimiento puede tener dos orígenes: natural, producto de las fuerzas de empujeque se crean como consecuencia de las diferencias de densidades (pesos específicos) entre laspartes calentadas y las no calentadas; o forzado, cuando se crea mediante un equipo mecánico, es decir, una bomba [17].

1.3 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 porel costo del combustible consumido (aproximadamente 80 % del costo de operación). Por estarazón apuntada, resulta necesario antes de continuar este estudio, proceder a un análisis de losdiferentes 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:

a) Sólidos:

- Bagazo.
- RAC (Residuos Agrícolas Cañeros)
- Residuos de cosechas agrícolas y forestales

b) Líquidos:

- Aceite combustible pesado (fueloil o petróleo)
- Aceite combustible ligero (gas oil o diesel)

c) Gaseosos:

- Gas natural (incluye gas acompañante del petróleo)
- Gas artificial y biogás

En el país los principales combustibles utilizados para generar vapor son: el aceite combustible pesado (conocido como *fuel oil* 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 (diesel) [18].

1.4 Contaminación

Uno de los temas que mayor proyección tiene en el debate político global y en el nuevo orden mundial emergente es la interacción entre la problemática ambiental y la problemática energética. Si bien la tendencia tradicional ha sido analizarlas por separado, como si cada una de ellas respondiera a lógicas diferentes, lo cierto es que ambas son variables de una misma ecuación político-estratégica cuya solución es en extremo compleja y que, además, se proyecta determinante para las relaciones de poder en el presente siglo.

La energía no es un recurso más, por el contrario, tiene un carácter estratégico único, dado que se pueden sustituir las fuentes energéticas, pero el fluido energético es insustituible, es imprescindible en cualquier proceso de transformación o producción. Por lo tanto, la energía siempre ha jugado un papel crítico en el proceso económico de cualquier sociedad.

Como es sabido, el aumento acelerado de la temperatura media del planeta, se debe a la concentración de los GEI en la atmósfera, que se producen por acción antropogénica, particularmente el dióxido de carbono (CO₂). Y su causa fundamental son las fuentes fósiles (carbón, gas y petróleo) de la matriz energética sobre la cual se ha edificado la Civilización Industrial. Sin embargo, este uso intensivo y extensivo de las fuentes fósiles para la producción de energía fue el que permitió que un sector minoritario de la humanidad, que denominamos Primer Mundo, haya alcanzado un altísimo nivel de vida para su población. Vale decir, el alto nivel de riqueza y desarrollo del Primer Mundo tiene directa relación con el “calentamiento global”. Ellos son los mayores consumidores de energía per cápita, por tanto, los mayores emisores de CO₂ a la atmósfera [19].

Al hablar de centrales termoeléctricas nos referimos especialmente a las que emplean carbón y fuelóleo como combustible, preocupándonos menos las que utilizan gas ya que su contaminación es menor.

Desde un planteamiento amplio, habrá que considerar en primer lugar la contaminación que se crea en la obtención del combustible en su proceso de minería y extracción y, en segundo lugar, en los efectos ambientales producidos al quemar éste en la propia central.

En la producción de electricidad, los combustibles mencionados emiten en su combustión una serie de productos contaminantes como óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, partículas sólidas, dióxido y monóxido de carbono e hidrocarburos [20].

Para eliminar las partículas sólidas, las centrales termoeléctricas utilizan instalaciones de separación de polvo, rebajando su evacuación exterior. Con el objetivo de evitar la contaminación local o próxima, las centrales termoeléctricas suelen disponer de chimeneas de considerable altura, lo cual hace que la contaminación química que producen se diluya mucho pero se transporte a largas distancias, afectando frecuentemente a otras zonas e incluso a otros países, lo que más adelante comentaremos al considerar la denominada contaminación transfronteriza. Para eliminar las partículas sólidas, las centrales termoeléctricas utilizan instalaciones de separación de polvo, rebajando su evacuación exterior. En la actualidad se han diseñado otros sistemas para la reducción mayor de estas emisiones y de las de CO₂, tanto en cantidad como en su almacenamiento en zonas geológicas adecuadas.

1.4.1 Contaminación en Cuba

En Cuba los principales contaminantes emitidos a la atmósfera son producto de las actividades generadoras de la energía, las industriales y otras actividades económicas del territorio [21].

La producción de energía a través de la quema de combustibles fósiles es una de las grandes causas de la contaminación ambiental y del creciente cambio climático. Las centrales eléctricas a base de estos combustibles son grandes emisoras de sustancias contaminantes como gases de combustión, residuos sólidos (principalmente cenizas) y residuos líquidos (combustibles, aditivos, aguas residuales, entre otras muchas sustancias peligrosas para el medio ambiente). Las irreversibilidades y el mal funcionamiento en una termoeléctrica causan e incrementan sobreconsumos de combustibles y la emisión de gases contaminantes a la atmósfera. Si bien las mayores irreversibilidades se producen durante el proceso de combustión en la caldera, el mal funcionamiento en el ciclo agua-vapor

contribuye a un incremento del consumo de combustibles y por ende un aumento de emisión de gases contaminantes [22].

En el Inventario de emisiones de las principales fuentes fijas de la República de Cuba para el año 2014, se puede apreciar que en cifras globales para el país, por fuentes fijas, la emisión de SO₂ es de alrededor de 273 mil toneladas al año, lo que representa el 56% de los contaminantes principales. El NO₂ con una emisión de casi 98 mil toneladas es el segundo en cantidad con un 20% del total. El material particulado representa el 18% de las emisiones, con más de 88 mil toneladas.

Las provincias que más emiten contaminantes principales gaseosos son:

Las provincias que más emiten SO₂ a la atmósfera son Artemisa y Camagüey, seguida de La Habana, Holguín, Matanzas y Cienfuegos. En estas provincias están presentes potentes fuentes asociadas al sector de la energía (centrales termoeléctricas y refinerías), las cuales producen emisiones por el alto contenido de azufre en el combustible utilizado.

Mientras que las provincias que más emiten NO₂ a la atmósfera son Cienfuegos, seguida de La Habana, Holguín y Camagüey. En estas provincias también están presentes fuentes altas emisoras asociadas al sector de la energía (centrales termoeléctricas y grupos electrógenos). En el caso de las provincias de Cienfuegos, Holguín y Camagüey también se adiciona la contribución de este contaminante por la presencia de la quema del bagazo por los centrales azucareros.

En el caso del Monóxido de Carbono las provincias más emisoras son La Habana, Villa Clara y Ciego de Ávila, estas altas emisiones son muestras de la no eficiencia de la combustión en las calderas debido al mal estado técnico de las mismas.

Mientras que los Compuestos Orgánicos Volátiles (COV) diferentes del Metano se aprecia que las provincias más emisoras son La Habana, Cienfuegos y Artemisa vinculadas a la refinación de petróleo y centrales termoeléctricas [23].

Los gases contaminantes más significativos originados en los procesos de combustión son el dióxido de azufre (SO₂), los óxidos de nitrógeno (NO y NO₂ simbolizados conjuntamente como NO_x), el dióxido de carbono (CO₂) y los metales pesados (arsénico (As), cadmio (Cd), cromo (Cr), cobre (Cu), mercurio (Hg), níquel (Ni), plomo (Pb), selenio (Se), zinc (Zn) y en algún tipo de fuelóleo, vanadio (V). De importancia cuantitativa bastante reducida son las emisiones de COV, que se desglosan en los no metánicos

(COVNM) y en metano (CH₄), de monóxido de carbono (CO), de óxido nitroso (N₂O), y a un nivel casi marginal el amoníaco (NH₃) [24].

En la tabla 1 se muestra un resumen de las principales emisiones en el territorio nacional en el periodo de 2013 a 2018 (expresadas en Gg), según la Oficina Nacional de Estadística (ONEI) [25]:

Tabla 1 Resumen de emisiones de GEI en Cuba.

Año	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	NO _x	CO	SO ₂
2013	27 973,8	354,8	11,7	97,1	546,4	462,7
2014	26 586,1	365,8	11,1	96,8	602,8	513,6
2015	24 892,9	398,4	9,8	84,3	502,2	614,5
2016	24 233,8	400,4	7,3	82,9	494,7	665,8
2017	26 532,4	103,7	8,5	104,9	450,8	780,3
2018	30 060,9	372,9	8,2	97,7	370,5	835,6

1.5 Huella ecológica

La huella ecológica es un indicador de sustentabilidad¹ diseñado por William Rees y Malthis Wackernagel a mediados de la década de los noventa del siglo pasado, para conocer el grado de impacto que ejerce cierta comunidad humana, persona, organización, país, región o ciudad sobre el ambiente.

Es, en palabras de Wackernagel, un sistema de contabilidad ecológica [26], que muestra las consecuencias de acciones y actividades en el planeta. Es una herramienta para determinar cuánto espacio terrestre y marino se necesita para producir todos los recursos y bienes que se consumen, así como la superficie para absorber todos los desechos que se generan, usando la tecnología actual.

De esta forma, la huella ecológica considera que el consumo de recursos y la generación de desechos pueden convertirse en la superficie productiva indispensable para mantener esos consumos y absorber esos desechos.

En su medición toma en cuenta la población total que habita un espacio (localidad, región, ciudad, país, planeta), en un periodo determinado, al tiempo que estima las superficies productivas dedicadas a [27]:

- Cultivos, para producir alimentos, fibras, aceites.
- Pastoreo, para obtener carne, leche, cuero, lana.
- Bosques, para disponer de madera que se usa en la producción de bienes o comocombustible.
- Mar, para obtener pescados y mariscos.
- Superficie construida, que incluye viviendas, industrias, carreteras y otras infraestructuras.
- Área de absorción, cantidad de bosque para absorber los desechos producidos por la quema de combustibles fósiles, como el carbón, el petróleo y el gas natural, utilizados, entre otros, por las industrias y para el transporte.
- Espacio para la conservación, reservado para el mantenimiento de la biodiversidad

Se considera que alrededor de una cuarta parte de la superficie del planeta es biológicamente productiva, lo que equivale aproximadamente a 13 mil 400 millones de hectáreas terrestres y marinas. De éstas, 90% estarían destinadas a las personas y 10 por ciento a preservar los otros seres vivos [28].

A cada uno de los habitantes del planeta nos tocaría 1.8 hectáreas para satisfacer nuestros consumos y absorber todos nuestros desechos, sin embargo, nuestra huella ecológica es de 2,7 hectáreas [29].

Cuando utilizamos más de 1,8 hectáreas se rebasa la capacidad del planeta para reemplazar lo que consumimos y desechamos. A esto se le conoce como déficit ecológico, que es la diferencia entre el área disponible (capacidad de carga o biocapacidad) y el área consumida (huella ecológica) en un lugar determinado. Eso se debe inicialmente a la sobreexplotación del capital natural y/o a la incapacidad de regeneración global y/o local.

Para el año 1961 se estimaba que la huella ecológica mundial equivalía al 70% de la capacidad de regeneración de la Tierra. En la década de los ochentas llegó al 100 por ciento y en la década siguiente excedió la disponibilidad planetaria [30].

La huella ecológica es un indicador útil para saber la salud del planeta; obtener información sobre las desigualdades entre países; conocer el impacto de nuestros consumos y desechos para modificarlos en favor del ambiente; realizar estudios de sustentabilidad de poblaciones y territorios; planear las actividades de una empresa, sector económico, comunidad, región,

ciudad y país; diseñar, aplicar y evaluar políticas públicas en materia de desarrollo sustentable y, al combinarse con el Índice de Desarrollo Humano, establecer condiciones mínimas para avanzar en ese camino.

La huella ecológica y el desarrollo sustentable están íntimamente vinculados, en tanto que el primero es un indicador y una herramienta importante para la planeación del segundo.

Además, ambos apuntan al mismo objetivo: mejorar la calidad de vida de todos sin aumentar el uso de los recursos naturales más allá de la capacidad del ambiente de proporcionárnoslos indefinidamente sin comprometer nuestro futuro ni el de las siguientes generaciones [31].

CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS REQUERIDOS PARA EL CÁLCULO DE LOS INDICADORES DE EFICIENCIA DEL GENERADOR DE VAPOR.

2.1 Breve descripción de la entidad y de las condiciones primarias de estudio.

La termoeléctrica Lidio Ramón Pérez se encuentra en la Bahía de Cajimaya, Holguín y fue inaugurada oficialmente el 5 de enero del 2001, posee dos bloques de generación térmica y 24 unidades de generación de *fuel oil*, distribuidas en Felton y 10 en el municipio de Moa con el objetivo que fuese la central eléctrica de mayor capacidad de generación instalada en Cuba.

2.2 Eficiencia en el generador de vapor.

En los generadores de vapor, la eficiencia térmica generalmente se considera un indicador de eficiencia. Sin embargo, como opera en una central térmica, se incorporan cuatro indicadores que se consideran vitales para el análisis integral de la instalación en estudio: el consumo de combustible, el índice de generación de vapor, el consumo específico de combustible asociado con la producción total de electricidad en la CTE y el grado de pérdida de exergía. En los generadores de vapor, el rendimiento térmico bruto se puede calcular mediante dos métodos: el directo (MD) y el indirecto (MI), según el estándar ruso GOST [32].

2.2.1 Método directo.

La implementación del MD requiere la medición directa de parámetros de funcionamiento en la caldera y, por tanto, la eficiencia térmica bruta del equipo podría determinarse en la Tabla 2, Tabla 3, como [33,34]:

Tabla 2. Pérdidas por incombustión mecánica

BI (Adimensional)	1-2	3-4	5-7	8-10
q_{4v} (%)	0,2	0,4	0,8	0,9

Tabla 3. Valores recomendados para G_e [35]

Uso del generador de vapor	G_e
Central termoeléctrica	$(0,003 \dots 0,03) * D_{vSC}$
Uso industrial	$(0,02 \dots 0,07) * D_{vSC}$

$$\eta_{tGVMD} = 100 \cdot \frac{Q_u}{Q_d \cdot B} \quad (1)$$

En la Ec. (1) η_{tGVMD} es la eficiencia térmica bruta del GV, en %. Q_u es el calor útil, en kJ / h. Q_d es el calor disponible, en kJ / h y B es el consumo de combustible, en kg / h.

El calor útil Q_u se calcula utilizando la Ec. (2), considerando que se produce vapor sobrecalentado en la caldera en estudio y el vapor recalentado en dos etapas.

$$Q_u = D_{vSC} \cdot (h_{vSC} - h_{aa}) + D_{vSR} \cdot (h_{vSRC(2)} - h_{vERC(1)}) \quad (2)$$

En Ec. (2) D_{vSC} es el flujo de vapor sobrecalentado, en kg / h. h_{vSC} y h_{aa} son las entalpías del vapor sobrecalentado y el agua de suministro, en kJ / kg. D_{vSR} es el flujo de vapor recalentado, en kg / h. $h_{vSRC(2)}$ y $h_{vERC(1)}$ son las entalpías del vapor recalentado a la salida y entrada del recalentador, en kJ / kg.

El calor disponible Q_d se determina como:

$$Q_d = Q_b + Q_{fc} + Q_{fa} + Q_{atm} \quad (3)$$

En Ec. (3) Q_b es el poder calorífico inferior, en kJ / kg. Q_{fc} es calor físico del combustible, en kJ / kg. Q_{atm} es el calor introducido por el vapor de atomización, en kJ / kg. Q_{fa} es el calor físico del aire, sin embargo, es descuidado porque no se precalienta con fuentes de calor externas, entonces $Q_{fa} = 0$. Donde [36]:

$$Q_b = 339,2C + 1030,4H - 108,9(O - S) - 25,14W \quad (4)$$

$$Q_{fc} = t_c(1,737 + 0,0025t_c) \quad (5)$$

$$Q_{atm} = D_{vatm}(h_{vatm} - h_{vsgv}) \quad (6)$$

En Ec. (4) C , H , O , S , W representan respectivamente la composición elemental del combustible (carbono, hidrógeno, oxígeno, azufre y agua contenido expresado en % de masa).

En las Ecs. (5) y (6), t_c es la temperatura del combustible, en °C. D_{vatm} es el tasa de vapor utilizada en la atomización, en kg de vapor / kg de combustible; h_{vatm} y h_{vsgv} son las

entalpías del vapor de atomización y el vapor en el salida de la caldera, en kJ / kg. Los valores recomendados para D_{Vatm} se dan en la Tabla 4 [37].

Tabla 4. Valores recomendados para D_{Vatm}

Uso del generador de vapor	D_{Vatm}
Central termoeléctrica	(0,02...0,1)
Uso industrial	(0,1...1)

2.2.2 Método Indirecto.

La determinación del rendimiento térmico por el método indirecto (MI) prevé el cálculo de las pérdidas de calor presentes en el generador y con estos la eficiencia térmica bruta se obtiene como:

$$\eta_{iGVmi} = 100 - \Sigma q_n \quad (7)$$

Dónde:

$$\Sigma q_n = q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 + q_7 \quad (8)$$

En Ec. (7) η_{iGVmi} es la eficiencia térmica bruta de la caldera, calculada por el MI, en%. Σq_n es la suma de las pérdidas de calor, en%. q_2 , q_3 , q_4 , q_5 , q_6 y q_7 son las pérdidas de calor en los gases de escape, por incombustión química, por incombustión mecánica, por transferencia de calor al medio ambiente, con los residuos extraídos del horno y con las extracciones o purgas, en %.

Las pérdidas de calor q_2 , q_3 , q_4 , q_5 , q_6 y q_7 se calculan utilizando la ecuación propuestas por [38]. La pérdida de calor producida con los residuos extraídos del horno q_6 se considera insignificante porque no tiene importancia práctica, dado que la instalación funciona con combustibles líquidos, entonces $q_6 \approx 0$ [35].

La pérdida de calor q_2 se obtiene con la siguiente relación:

$$q_2 = \frac{(h_{sgv} - \alpha \cdot h_{aire}) \cdot (100 - q_4)}{Q_d} \quad (9)$$

Dónde:

$$\alpha = N_2 / (N_2 - 3,76 \cdot (O_2 - 0,5 \cdot CO - 0,5 \cdot H_2 - 2 \cdot CH_4)) \quad (10)$$

$$N_2 = 100 - (CO + RO_2 + O_2 + H_2 + CH_4) \quad (11)$$

En las Ecs. (9) a (11) h_{sgv} y h_{aire} son las entalpías de los gases en el salida del GV y el aire teórico requerido respectivamente, en kJ/kg. α es el coeficiente de exceso de aire (adimensional). N_2 , O_2 , CO , H_2 , RO_2 , CH_4 son los volúmenes de nitrógeno, oxígeno, monóxido de carbono, hidrógeno, gases triatómicos y metano en los gases secos, medidos en el punto de la caldera donde es necesario conocer el coeficiente de exceso de aire, en%.

No se registraron emisiones de hidrógeno en los gases producidos por la combustión, por tanto en el balance térmico se consideró que $H_2 = 0$. La pérdida de calor debida a la incombustión química, q_3 , se determina como [39]:

$$q_3 = A (100 - q_4) \cdot [126,4CO + 108H_2 + 358,1CH_4] / Q_d \quad (12)$$

Dónde:

$$A = [1,86 \cdot (C + 0,375 \cdot S)] / (RO_2 + CO + CH_4) \quad (13)$$

Las pérdidas por incombustión mecánica, q_4 , se determina como:

$$q_4 = q_{4v} \quad (14)$$

En combustibles líquidos, el proceso de combustión no produce residuos, por lo tanto, el Índice de Bacharach (BI) da la magnitud de la pérdida total q_{4v} . En este sentido, la literatura consultada ofrece las siguientes recomendaciones (ver Tabla 2) [40].

La pérdida de energía por transferencia de calor q_5 , del GV al medio ambiente, considera radiación, conducción y convección. La parte fundamental del calor perdido sale por conducción a través de las paredes, por lo que la magnitud de esta pérdida va a depender directamente de las características aislantes de las mismas. Esto ocurre a través de registros abiertos, paredes, piso y techo del generador, esta pérdida puede obtenerse mediante [41]:

$$q_5 = q_{5n} \cdot \frac{G_n}{G} \quad (15)$$

Dónde:

q_{5n} es el valor de pérdidas por transferencia de calor a través de las paredes del generador de vapor, en %

q_5 es el valor de pérdidas por transferencia de calor a través de las paredes del generador de vapor a producción parcial, en %

G_n es el gasto nominal del GV, en kg/s

G es el gasto de vapor sobre-calentado del GV, en kg/s

Entonces:

$$q_{5n} = \frac{5}{G^{0,383} \cdot T^{0,01}} + \frac{0,054}{V^{0,88}} \quad (16)$$

Dónde:

G es el gasto de vapor sobre-calentado del GV, en kg/s

T es la temperatura de la pared del GV, en °C

V es la velocidad del viento que actúa sobre el generador de vapor, en m/s

Esta expresión es válida en el siguiente intervalo de valores:

$$1 \leq G \leq 650 \quad ; \quad 0 < V \leq 5 \quad ; \quad 30 < T \leq 70$$

La pérdida de calor por las extracciones o purgas que se realizan en la cúpula de la caldera se determina como [42]:

$$q_7 = 100 \cdot G_e \cdot h_e / Q_d B \quad (17)$$

En Ec. (17) G_e es el flujo de extracciones o purgas (ver Tabla 3). h_e es la entalpía de las extracciones, en kJ / kg.

En la producción de electricidad, es muy común relacionar el equivalente consumo de combustible con la energía eléctrica producida, para determinar un índice de consumo específico, dado por:

$$B_{Esp} = B \frac{Q_b + 2260,4 \left(\frac{9H+W}{100} \right)}{43160 \cdot P_E} \quad (18)$$

Los gases de combustión son evacuados por el ventilador de tiro inducido (IDF), mientras que el flujo de aire al generador es suministrado por el ventilador de tiro forzado (FDF).

Estos valores se pueden estimar con las siguientes ecuaciones:

$$m_a = \beta_1 B V_a \alpha \cdot \left[\frac{T_{af} + 273,15}{273,15} \right] \cdot \frac{1,01 \times 10^5}{h_b} \quad (19)$$

$$m_g = \beta_1 B [V_g^0 + (\alpha - 1) \cdot V_a] \cdot \left[\frac{T_g + 273,15}{273,15} \right] \cdot \frac{1,01 \times 10^5}{h_b} \quad (20)$$

En las Ecs. (19) y (20) m_a y m_g son el flujo entregado por el FDF y el IDF respectivamente, en m^3 /s. β_1 es un factor de seguridad, (1,02...1,05). T_{af} es la temperatura del aire en la entrada de FDF, en °C. T_g es la temperatura de los gases de combustión en la salida del IDF, en °C. α es el coeficiente de exceso de aire (adimensional). V_a es el volumen teórico requerido de aire seco, en m^3 /kg. V_g es el volumen total teórico de gases, en m^3 /kg. h_b es el presión de aire barométrica, en Pa.

El volumen de aire seco teórico V_a se puede obtener como:

$$V_a = 0,0889 \cdot (C + 0,375 \cdot S) + 0,265H - 0,0333O \quad (21)$$

El volumen teórico de gases total V_g puede obtenerse como [35]:

$$V_g^0 = V_{RO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} \quad (22)$$

$$V_{RO_2} = 0.01866 \cdot (C + 0.375 \cdot S) \quad (23)$$

$$V_{H_2O} = 0.111H + 0.0124W + 0,00161 \cdot ch \cdot V_a \quad (24)$$

$$V_{N_2} = 0.79 \cdot V_a + 0.008 \cdot N \quad (25)$$

En las Ecs. (21) a (25) V_{RO_2} es el volumen real de gases triatómicos, en m^3/kg . V_{H_2O} y V_{N_2} son el volumen teórico de agua y nitrógeno en gases de combustión, en m^3/kg . ch es un valor constante (13...23). V_g^0 y V_g son el volumen teórico y real de los gases de combustión, en m^3/kg .

2.3 Parámetros de operación del generador de vapor

Para obtener los parámetros de funcionamiento del generador de vapor, se llevó a cabo un experimento pasivo (diseño de investigación no experimental). Está recomendado para instalaciones sujetas a producciones de régimen ininterrumpido, como en la CTE estudiada [43,44].

Las medidas se tomaron durante una prueba realizada en la caldera, diseñada para cuatro cargas, con respecto al funcionamiento nominal de la TPP, 150 MW (60%), 180 MW (72%), 220 MW (88%) y 250 MW (100%). La Tabla 5 muestra las cargas reales promedio obtenidas durante la prueba. Los valores medios de las 10 determinaciones correspondientes a cada una de las Se calcularon los parámetros de funcionamiento y con estos la energía Se determinaron indicadores de eficiencia de la instalación.

Se utilizaron varios tipos de sensores para medir los parámetros del proceso de generación de vapor, que envía la señal a la sala de control de la CTE, que se convierte en datos utilizables por operadores e investigadores.

Tabla 5. Principales parámetros de operación en el generador

Parámetros	Carga en la CTE (MW)				Unidad
	150	180	220	250	
Flujo de vapor sobrecalentado	518,5	599	720,9	865,4	t/h
Temperatura de vapor sobrecalentado	524,9	530	530	530	°C
Presión de vapor sobrecalentado	13,52	13,57	13,62	13,7	MPa
Flujo del agua suministrada	533	614,9	738,1	885	t/h
Temperatura del agua suministrada	213	221	229	231	°C
Presión del agua suministrada	15,15	15,3	15,57	15,75	MPa
Flujo de vapor recalentado	213	247,5	301	347,3	t/h
Temperatura en la entrada del recalentador	328	339	349	359	°C
Presión en la entrada del recalentador	2,17	2,58	3,08	3,58	MPa
Temperatura en la salida del recalentador	490,7	515	524,6	527	°C
Presión en la salida del recalentador	2,06	2,47	2,98	3,49	MPa
Flujo de vapor atomizado	2,42	2,43	2,43	2,44	t/h
Presión de vapor atomizado	0,75	0,75	0,75	0,75	MPa
Temperatura de vapor atomizado	237,7	238,2	239	238,7	°C
Flujo de extracción o purga	14,7	15,9	17,2	19,6	t/h
Presión en el domo	14,87	14,93	14,98	15,07	MPa
Consumo de combustible	38,07	44,18	52,71	63,77	t/h
Temperatura del combustible	140,9	136,2	134,5	130,8	°C
Temperatura de salida del gas	151,8	156,6	161,5	166,6	°C
Temperatura ambiente	32	32	32	32	°C

La composición química de la masa del fueloil, se obtuvo en el laboratorio destinado a estas pruebas. Durante la prueba, el GV quemó el mismo tipo de combustible (petróleo crudo de alto contenido sulfurado). Los resultados medios obtenidos para el combustible y los gases producidos por la combustión se muestran en las Tablas 6 y 7.

Tabla 6. Resumen del método de prueba usado en el documento

Método de prueba ASTM	Parámetro determinado	Valor limite
D-445 (Viscosidad a 50°C)	297,29 mm ² /s	MaV (650 mm ² /s)
D-1298 (Gravedad a 15°C)	13,6°API	MiV (11,0°API)
D-189 (Índice de negrura)	11,54%	MaV (14%)
D-382 (Cenizas)	0,02%	MaV (0,1%)
D-95 (Agua)	1%	MaV (2%)
D-129 (Azufre)	7,17%	MaV (7,5%)
D-473 (impurezas mecánicas)	0,05%	MaV (0,08%)
D-1548 (Asfalto)	11,73%	MaV (18%)
D-1298 (Densidad a 15°C)	0,9747 g/cm ³	MaV (0,9924 g/cm ³)
D-4698 (Mayor valor de calentamiento)	40,74 MJ/kg	MiV (38,1 kJ/kg)

Tabla 7. Composición química del combustible

Variante del combustible	C	H	O	S	N	W
V1	81,3	9,9	0,4	7,2	0,29	0,9
V2	81,6	9,6	0,5	7,16	0,25	0,9
V3	81,7	9,2	0,4	7,15	0,64	0,9
V4	81,8	9,1	0,5	7,2	0,38	1
V5	81	10	0,4	7,17	0,17	1,2
V6	82	8,9	0,4	7,17	0,43	1,1
Promedio	81,6	9,5	0,4	7,17	0,35	1

2.4 Metodologías para el cálculo del costo del impacto ambiental

2.4.1 Método de Veziroglu

En 1998 T. Veziroglu se planteó el estudio para 8 grupos de daños que consideran en total 33 tipos de ellos (ver Tabla 8) [45]:

Tabla 8. Estimación económica del daño ambiental por el uso de combustibles fósiles.

Tipo de combustible	\$/ (GJ.año)
Carbón	14,51

Petróleo	12,52
Gas natural	8,26
(Promedio de todos)	12,05

Se considera que el promedio de los daños económicos estimados respecto al producto interno bruto mundial es de 11%. Ver la Tabla 9.

Tabla 9. Daño ambiental estimado económicamente por tipo de combustible fósil.

Tipo de daño (n)	Daño ambiental 1998 (\$/GJ)					
	Carbón		Petróleo		Gas Natural	
	(Dd)	(Sub)	(Dd)	(Sub)	(Dd)	(Sub)
Efecto en humanos		5,16		4,19		3,09
Muertes prematuras	1,75		1,42		1,05	
Gastos médicos	1,75		1,42		1,05	
Pérdidas de eficiencia laboral	1,66		1,35		0,99	
Efecto en animales		0,75		0,63		0,45
Pérdida de ganado domestico	0,25		0,21		0,15	
Pérdida de vida salvaje	0,5		0,42		0,3	
Efecto en plantas y bosques		1,99		1,61		1,2
Reducción de los cultivos por la capa de ozono	0,25		0,21		0,15	
Reducción de los cultivos por lluvias ácidas	0,13		0,1		0,07	
Efecto en la flora silvestre (plantas)	0,77		0,62		0,46	
Deforestación (daño económico)	0,27		0,22		0,16	
Deforestación (efecto en la biodiversidad)	0,53		0,43		0,33	
Pérdida del valor recreativo	0,04		0,03		0,03	
Efecto en ecosistemas acuáticos		0,26		1,55		0,16
Derrames de petróleo	(-)		0,44		(-)	
Fugas de tanques submarinos	(-)		0,9		(-)	
Lagos encalados	0,04		0,03		0,03	
Pérdida de población de peces	0,04		0,03		0,03	
Efecto en la biodiversidad	0,18		0,15		0,1	

Efecto en las construcciones del hombre		1,66		1,34		0,98
Degradación de monumentos y construcciones históricas	0,18		0,15		0,1	
Deterioro de construcciones y casas	0,37		0,3		0,22	
Corrosión de construcciones de acero	0,99		0,8		0,59	
Suciedad de ropas, autos, etc.	0,12		0,09		0,07	
Otros costos por contaminación del aire		1,45		1,16		0,88
Reducción de visibilidad	0,3		0,23		0,18	
Costos de reducción de contaminación del aire	1,15		0,93		0,7	
Efectos de minería a cielo abierto		0,73		(-)		(-)
Efectos de cambio climático		2,04		1,66		1,22
Olas de calor - Efecto en humanos	0,27		0,22		0,16	
Sequía						
Pérdidas en la agricultura	0,16		0,13		0,1	
Pérdidas del ganado	0,13		0,1		0,07	
Pérdidas de bosques	0,16		0,13		0,1	
Pérdidas de la flora y fauna silvestres	0,93		0,75		0,56	
Problemas de escasez de agua y producción de energía	0,25		0,21		0,15	
Inundaciones	0,07		0,06		0,04	
Tormentas, huracanes, tornados	0,07		0,06		0,04	
Efecto de la subida del nivel del mar		0,47		0,38		0,28
TOTALES		14,51		12,52		8,26

Nota: (Dd) Daño detallado ; (Sub) Subtotal

Resulta de suma importancia buscar nuevos índices para actualizar la propuesta de Veziroglu. Por ejemplo la información a considerar puede ser [46]:

- emisiones de procesos de combustión
- factor de aire atmosférico limpio (ARF)
- temperatura promedio anual
- nivel del mar
- amplitud de la capa de ozono

- magnitud de los deshielos
- fracción de deforestación
- disminución de cantidad de especies vivas
- aumento de la desertificación
- desarrollo de epidemias,
- fenómenos climáticos (ciclones, tsunamis, terremotos, tornados, etc).

Para con estos valores proceder a calcular las pendientes de las funciones correspondientes en función del tiempo y obtener los valores para cálculos en la actualidad del daño estimado por uso de combustibles fósiles.

2.4.2 Método de Ocañas

En 2006 Víctor Ocañas planteó en su tesis doctoral una metodología que puede cuantificar integralmente los daños ambientales por uso de la energía a partir del criterio sobre la Sostenibilidad Energética Ambiental. El mismo toma como punto de partida valorar la incidencia de cuatro factores necesarios que son [47]:

- *Grado de renovabilidad de la energía consumida en el sistema, α
- *Eficiencia de las transformaciones energéticas, β
- *Grado de limpieza de la energía consumida, γ
- *Grado de Auto abastecimiento energético territorial del sistema, λ

Donde los factores de peso de cada uno son: σ_α , σ_β , σ_γ , y σ_λ

Ocañas propone entonces, como índice de sostenibilidad energético ambiental (I_{se}) la expresión matemática siguiente:

$$I_{se} = \sigma_\alpha * \alpha + \sigma_\beta * \beta + \sigma_\gamma * \gamma + \sigma_\lambda * \lambda$$

El valor calculado de I_{se} siempre será un número menor que uno, pues en ningún caso las transformaciones energéticas logran la perfección termodinámica y ambiental.

2.4.3 Método de Vizcón

Los trabajos de Roberto Vizcón en 2013 y 2018 a partir de lo planteado por T. N. Veziroglu y de informes publicados en internet de la Oficina Nacional de Estadística Cubana (ONE) donde se encuentran tablas de valores anuales de consumos de combustibles de origen fósil,

del PIB per cápita y de los gastos monetarios para atenuar los daños que la naturaleza ocasionó a Cuba en dichos períodos, se resumen la Tabla 10:

Tabla 10. Índices calculados a partir de información [46,51].

El producto interno bruto (millones \$)	91370
Consumo total de combustibles (millones toe); Proviene de producción nacional	8,701 4,06
Potencia eléctrica instalada (MW); De ella en grupos electrógenos (40,2%)	6 454 2 525
Generación total de energía eléctrica (GWh); De ella en grupos electrógenos (20,7%)	20 459 4 242
Consumo de energía total (GJ/habitante); De ella por energía eléctrica (16,4%)	40,4 6,55
Gastos en inversiones por protección de medio ambiente (millones \$)	623,4
Superficie plantada de nuevos árboles (miles ha); Para un crecimiento de bosques (%)	19,750 0,61
Reforestación para cubrir daños estimados por la huella ecológica para absorber el CO ₂ (miles ha)	14,34
Generación eléctrica (kWh/habitante), incluye todos los servicios del país	1820,3
Daño ambiental estimado, para la cantidad de combustible fósil empleado: - según el PIB anual (%) - según gastos de inversiones por protección ambiental (\$/G/año)	0,63 1,71

2.4.4 Método de Camaraza:

Según el doctor cubano Yanán Camaraza es posible estimar el monto financiero del daño ambiental por dos componentes, estas son las emisiones de gases de efecto invernadero por combustión de combustibles fósiles y también por el consumo del agua potable, esto basado en informes de [51-54]. Teniendo en cuenta estas consideraciones propone para el caso de Cuba:

Por consumos de agua:

$$G_{Uso\text{agua}} = 0.145 \cdot e^{0.0596(W_R)}$$

Dónde:

$G_{Uso\text{agua}}$; daño estimado anual por gastos de agua potable; \$/año

W_R ; es el consumo de agua anual; m³/año

Por emisiones de volúmenes de gases con efecto invernadero (CO₂, SO₂, CH₄, NO₂, NO_x y CO):

$$G_{Emis} = 3.911 \cdot A \cdot e^{0.226B} \quad (26)$$

Dónde:

$$A = \ln((CO_2)^{0.1} \cdot SO_2)^{0.1} + 0.252 \quad (27)$$

$$B = \log \left[\frac{(CH_4 \cdot NO_x \cdot CO)^{0.04} - (SO_2)^2}{N_2O} \right] \quad (28)$$

Dónde:

Los volúmenes anuales de gases contaminantes son dados en Gg/año, mientras que G_{Emis} se obtiene en MUSD/año. Los valores obtenidos con el empleo de la expresión para calcular G_{Emis} se sitúan en los intervalos recomendados (3,2–13,8) MUSD/año [53,54].

CAPÍTULO III. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

3.1 Generalidades.

En el capítulo III se presentarán los resultados del cálculo de los indicadores de eficiencia del generador de vapor, así como el impacto ambiental y la huella ecológica de la CTE de Felton partiendo de los indicadores mencionados.

Los valores de eficiencia térmica fueron obtenidos mediante los métodos directo e indirecto y la huella ecológica e impacto ambiental empleando la metodología de Camaraza.

3.2 Volumen de aire, gases y exceso de aire.

El volumen teórico de aire V_a , el volumen real de gases triatómicos V_{RO_2} , el volumen teórico de nitrógeno V_{N_2} y vapor de agua V_{H_2O} tienen el mismo valor para todas las condiciones de carga, porque solo dependen de la composición química del combustible quemado y esto no cambió durante la prueba de funcionamiento del generador de vapor (ver Tabla 11).

Tabla 11. Volumen de gases y coeficiente de exceso de aire.

Parámetros	Carga de la CTE (MW)				Promedio	Unidad
	150	180	220	250		
V_a	9,99	9,99	9,99	9,99	9,99	m ³ /kg
V_{RO_2}	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57	m ³ /kg
V_{N_2}	7,89	7,89	7,89	7,89	7,89	m ³ /kg
V_{H_2O}	1,447	1,436	1,425	1,415	1,431	m ³ /kg
V_g^0	10,91	10,9	10,89	10,88	10,89	m ³ /kg
α	1,117	1,111	1,096	1,067	1,098	-
V_g	12,12	12,03	11,86	11,56	11,89	m ³ /kg

El exceso de aire influye en prácticamente todos los indicadores de rendimiento energético de los generadores de vapor, porque afecta en gran medida la eficiencia del proceso de combustión. El generador trabajó con un exceso de aire medio de 9,8%. Sin embargo, los

valores mínimo y máximo (6,7 y 11,7%) se alcanzaron para las cargas de 250 y 150 MW respectivamente. En el primer caso se considera insuficiente y, en el segundo, el exceso de aire suministrado es desproporcionado de acuerdo con la productividad y consumo de combustible exigidos por el generador de vapor [50]. Estos aspectos provocaron una contracción del rendimiento térmico medio de la instalación para estas cargas.

3.3 Entalpías y flujos de gas y aire.

La entalpía media teórica de los gases que salen de la caldera ascendió a 2,42 MJ / kg, y los valores calculados para la entalpía real representaron entre el 6,63 y el 7,39% del calor disponible (ver Tabla 12). Estos se consideran adecuados para la instalación ya que no genera pérdidas de calor con gases superiores al 6,0% (ver Tabla 13). Sin embargo, su temperatura debe ser estrictamente controlada porque cuando se combina con flujos de aire y gas (m_a y m_g) determina el rendimiento térmico del generador de vapor. Los valores de h_{aire} y h_{sgv} dados en la Tabla 12 se obtuvieron de la representación gráfica de estos parámetros, disponible en [35].

Tabla 12. Entalpías, flujos de masa y calor disponible.

Parámetros	Carga de la CTE (MW)				Promedio	Unidad
	150	180	220	250		
h_{aire}	2,02	2,08	2,15	2,22	2,12	MJ/kg
h_{sgv}	2,55	2,61	2,66	2,68	2,63	MJ/kg
Q_d	38,435	38,422	38,415	38,408	38,42	MJ/kg
m_a	136,68	157,71	185,45	218,42	174,56	m ³ /s
m_g	206,11	240,41	286	341,17	268,42	m ³ /s

3.4 Pérdidas de calor y eficiencia térmica por método indirecto.

La determinación de las pérdidas de calor se realizó midiendo directamente los parámetros de funcionamiento de la instalación. Las pérdidas de energía a través de gases, q_2 , mínimo y máximo, alcanzaron 5,35 y 5,75% respectivamente, para las dos condiciones de cargas más bajas (ver Tabla 13). El valor medio ascendió al 5,57%, lo que constituye un desempeño satisfactorio (que corresponde al trabajo de la caldera después de un mantenimiento parcial), a pesar de haber sido diseñado para trabajar con combustible diesel

y que actualmente opera con petróleo crudo con alto contenido de azufre. Sin embargo, el valor alcanzado impactó la contracción del desempeño térmico promedio obtenido por el IM (91,6%), que es un 2,5% inferior al valor nominal (94%). Esta pérdida de calor es la mayor de todas las pérdidas que se producen en las calderas; por lo tanto es una prioridad permanente mantenerlo lo más bajo posible.

Tabla 13. Pérdidas de calor y eficiencia térmica bruta (MI)

Parámetros	Carga de la CTE (MW)				Promedio (%)
	150	180	220	250	
q ₂	5,35	5,52	5,67	5,75	5,57
q ₃	0,08	0,09	0,1	0,11	0,1
q ₄	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
q ₅	0,58	0,45	0,31	0,23	0,39
q ₇	1,61	1,51	1,37	1,29	1,45
Σq _n	8,52	8,47	8,35	8,28	8,41
η _{iGVmi}	91,48	91,53	91,65	91,72	91,59

Las pérdidas de calor por incombustión química, q₃, y las pérdidas por calor intercambio con el medio ambiente, q₅, no influyó significativamente en el rendimiento térmico. Sus valores medios no superaron el 0,11 y el 0,4% (ver Tabla 13). Sin embargo, la pérdida de energía térmica que se produce con las extracciones, q₇, alcanzaron el 1,45% debido a los altos flujos de purga llevados a cabo en el domo, que osciló entre 14,7 y 19,6 t/h, con 16,85 t/h siendo su valor medio.

En el balance térmico, la pérdida de calor debida a incombustión mecánica, q₄, se determinó mediante el BI, que en todos los casos fue en el intervalo de 9 a 10, por lo tanto, q₄ = 0,9%.

3.5 Pérdidas de calor y eficiencia térmica por método directo.

En el rendimiento energético del generador de vapor, los calores que intervienen en el proceso de producción de vapor juegan un papel importante. Estos fueron principalmente determinados por los flujos de vapor generados y de alta calidad Q_u (sobrecalentado y recalentado), y por las propiedades del combustible utilizado Q_d. Para el último, el menor

poder calórico del fueloil Q_b tiene una influencia significativa, que fue 38 132 kJ/kg, solo 336 kJ/kg menor que el valor de referencia de fuel-oil normativo cubano (38468 kJ / kg). También afecta, aunque en menor medida, el calor físico del combustible, que era una consecuencia de calentar el aceite a una temperatura promedio de 135.6 °C (ver Tabla 4). Tales comportamientos determinaron que el desempeño promedio de la caldera de vapor, obtenido por el MD, fue del 92,76% (ver Tabla 14).

Tabla 14. Calores y eficiencia térmica bruta (MD)

Parámetros	Carga de la CTE (MW)				Promedio	Unidad
	150	180	220	250		
Q_u	378,78	436,57	516,84	617,44	487,41	MW
Q_b	38,132	38,132	38,132	38,132	38,132	kJ/kg
Q_{fc}	294,33	283,03	278,85	269,97	281,54	kJ/kg
Q_{atm}	8,82	7,48	6,32	4,73	6,84	kJ/kg
η_{iGVmd}	93,19	92,59	91,88	90,75	92,1	%

3.6 Eficiencia térmica del generador de vapor.

Los valores medios del rendimiento térmico son similares para diferentes condiciones de carga. La diferencia entre sus respectivos valores extremos fue de 1.09 % (ver Tabla 15), mientras que la eficiencia media térmica fue 91,86%. Estos resultados, completamente analizados, corroboran que en el GV hay un alto grado de aprovechamiento de energía térmica. Estos resultados se ven afectados por el tiempo de funcionamiento transcurrido, el generador trabaja con cargas excesivas durante largos períodos (debido a la importancia social y económica que tiene para el país), y la simplificación de las condiciones internas de funcionamiento en la CTE.

Tabla 15. Eficiencia total

Parámetros	Carga de la CTE (MW)				Promedio	Unidad
	150	180	220	250		
$\frac{\eta_{iGVmi} + \eta_{iGVmd}}{2}$	92,33	92,09	91,76	91,24	91,86	%

3.7 Índice de generación de vapor y consumo específico de combustible.

Estos dos indicadores son vitales en el funcionamiento de la caldera bajo análisis, porque relacionan el consumo de combustible con la producción de vapor (kg vapor/kg combustible) y electricidad (g/kWh). Por su determinación, el costo del combustible se calculó aplicando la integración de los métodos directo e indirecto y comparando con los valores medidos experimentalmente en la instalación.

Los valores obtenidos, para el consumo de combustible y el índice de generación de vapor, son superiores a los que se obtendrían para las condiciones nominales, porque la eficiencia térmica media real fue 2,14% menor (ver Tabla 16), con respecto a las condiciones de diseño (94%).

La disminución de la eficiencia térmica bruta experimentada por el generador fue influenciado por deficiencias en los calentadores de alta presión, recalentadores y economizador. Estos dispositivos son determinantes para obtener parámetros operativos racionales y altos indicadores de eficiencia energética en instalaciones de producción de vapor.

Como puede verse en la Tabla 16, el consumo específico de combustible durante la prueba fue de 231,9 g/kWh (valor medio). Esta baja mejora puede ser atribuible al mantenimiento parcial recibido por la caldera justo antes la prueba, de ahí la importancia de respetar los ciclos de mantenimiento planificados para la instalación, aspectos que por diversas razones no siempre son mencionados.

Tabla 16. Indicadores seleccionados de eficiencia energética

Parámetros	Carga de la CTE (MW)				Promedio	Unidad
	150	180	220	250		
B	38,07	44,18	53,71	63,77	49,68	t/h
B _g	35,3	41,05	49,05	57,62	45,75	t/h
I _{gv}	13,37	13,38	13,62	13,29	13,41	kg _v /kg _F
B _{Esp}	238,7	227,9	226,7	234,2	231,9	g/kWh

Obviamente, los indicadores de sostenibilidad de la eficiencia energética del generador dependen en gran medida de la ejecución en el tiempo y la eficacia del mantenimiento realizado en la instalación. En este equipo, debido a su principio de funcionamiento, es

relevante controlar el ensuciamiento y corrosión de las superficies de transferencia de calor en áreas de alta y baja temperatura, que ocurren inevitablemente cuando se queman combustibles fósiles y se vuelven más agudos cuando tienen un alto contenido de azufre, estudio de caso en cuestión [55].

En la Tabla 17, parámetros promedio de la operación de la CTE durante el año 2019 se resumieron, mientras que en la Tabla 18 los valores de emisión promedio y la huella ecológica (ET) durante el año 2019 se resumen, y condiciones posteriores al mantenimiento ejecutado en la CTE en febrero de 2020. Para ello se aplica la metodología descrita en [25].

Tabla 17. Promedio de parámetros de operación, año 2019.

Mes	P (MWh)	B _M	B _{Esp}
Enero	224,7	70,3	290,4
Febrero	233,2	71,6	284,9
Marzo	235,3	73,7	290,7
Abril	230,9	72,8	292,7
Mayo	223,4	70,7	293,9
Junio	226,9	71,3	292
Julio	223	68,4	284,9
Agosto	211,9	64,6	283
Septiembre	212,8	65,1	284,2
Octubre	216,9	67,9	290,9
Noviembre	211,4	66,4	291,5
Diciembre	207,1	64,4	288,9
Promedio	221,5	68,9	289
Condición actual	249,6	63,8	231,9

Tabla 18. Promedio de emisiones y huella ecológica, año 2019.

Mes	CO ₂ * (t/h)	CO* (t/h)	SO ₂ * (t/h)	NO* (t/h)	ET (USD/GJ año)	ET* (USD/h)
Enero	219,95	2,71	6,09	0,72	12,91	34,6
Febrero	223,97	2,76	6,2	0,73	12,96	35,4
Marzo	230,56	2,84	6,39	0,75	13,04	36,7
Abril	227,75	2,8	6,31	0,74	13,01	36,1
Mayo	221,24	2,72	6,13	0,72	12,93	34,9
Junio	223,29	2,75	6,18	0,73	12,96	35,2
Julio	214,14	2,63	5,93	0,7	12,84	33,5
Agosto	202,05	2,49	5,6	0,66	12,68	31,2
Septiembre	203,78	2,51	5,64	0,66	12,71	31,5
Octubre	212,63	2,62	5,89	0,69	12,82	33,2
Noviembre	207,71	2,56	5,75	0,68	12,76	32,3
Diciembre	201,6	2,48	5,58	0,66	12,68	31,1
Promedio	215,72	2,65	5,98	0,7	12,85	33,8
Condición actual	199,67	2,46	5,53	0	12,65	30,8

Los retrasos en el mantenimiento programado de la CTE, produjeron un impacto negativo en los indicadores de funcionamiento, provocando un incremento igual a 26.5 kUSD por concepto de mitigación, además, conduce a una deficiente operación de la planta (se emitieron adicionalmente 140,6 Gg/año de CO₂) [25].

Al respecto [25] señala que en la zona de alta temperatura, existen esencialmente dos aspectos principales que influyen negativamente en la eficiencia y trabajo confiable del generador de vapor: el bajo coeficiente de temperatura conductividad de los sedimentos que forman $k = (0.08 \dots 4.0) \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ [55-57], lo que conduce a un coeficiente de transferencia de calor global bajo, y el aumento de la resistencia aerodinámica de las tuberías de gas, lo que puede provocar la limitación de la carga de la caldera debido a la insuficiente capacidad del ventiladores de tiro inducido. Por otro lado, en la zona de baja temperatura, los sedimentos se caracterizan por su gran adhesividad y corrosión, en correspondencia con

la composición química del combustible, siendo responsable de la rotura prematura de sobrecalentadores, recalentadores y economizadores en las calderas.

Durante la operación en 2019, el costo promedio de mitigación requerido por traza ecológica es igual a 33,8 USD/h y la emisión de dióxido de carbono es de 215,7 t/h. Por el contrario, después del período de mantenimiento, este costo se reduce en 3,1 USD/h (27,2 kUSD/año), mientras que ya no se emiten 16 t/h de dióxido de carbono (140,6 Gg/año).

Obviamente, el problema anterior afecta en gran medida la disponibilidad de la instalación y genera alteraciones importantes en la red principal de energía de los indicadores de eficiencia, ya que es la única caldera con la que cuenta la instalación. Esta conduce a graves consecuencias sociales y económicas, porque la salida prevista del funcionamiento de la instalación provoca daños en el suministro de energía eléctrica a todos los sectores de la sociedad (residencial, productivo y servicios). Por este motivo, el equipo técnico de la planta trabajará en analizar estas complejidades y sus posibles soluciones, así como cuantificar el impacto de las acciones técnico-organizativas propuestas [59].

3.8 Monto financiero del daño ambiental por emisiones de GEI.

A partir de los valores obtenidos en la Tabla 18 y utilizando el método de Camaraza se obtuvo el monto financiero de Felton con respecto al daño ambiental producido por emisiones de gases. Se efectuó la conversión de unidades de los volúmenes de gases de t/h a Gg/año (ver Tabla 20) y se procedió a calcular a partir de las ecuaciones 26, 27 y 28, despreciándose los valores de CH₄ y N₂O.

Tabla 20. Conversión de unidades (elaboración propia)

Volúmenes anuales	t/h	Gg/año
CO ₂	215,72	1889,7
CO	2,65	23,214
SO ₂	5,98	52,38
NO	0,7	6,132

El monto financiero (G_{Emis}) resultó ser de 11,075 MUSD/año el cual es relativamente alto dentro de los valores recomendados ya que difiere en solo 2,725 MUSD/año del valor máximo recomendado por la metodología, representando esta diferencia un 19,75% del máximo establecido.

CONCLUSIONES

Una vez realizado el cálculo de los indicadores de eficiencia del generador de vapor de Felton, la huella ecológica y el monto financiero por impacto ambiental se pudo resumir que:

- Es importante proporcionar el exceso de aire necesario de acuerdo con la productividad y consumo de combustible exigidos por el generador de vapor.
- Las pérdidas de calor a través de gases (q_2) deben ser mantenidas lo más bajo posible debido a que es la mayor de las pérdidas que influye en el desempeño termodinámico del generador.
- Los mantenimientos periódicos de la instalación son de suma importancia para lograr mantener los indicadores de eficiencia energética.
- Es necesario mitigar las misiones de GEI en la empresa debido a la incidencia directa de estos en el costo por impacto ambiental, teniendo el mismo un valor de 11,075 MUSD/año.

RECOMENDACIONES

Según los resultados obtenidos en el presente material se proponen las siguientes recomendaciones:

- Tener en consideración este estudio como una base de datos para la realización de trabajos similares en otras centrales termoeléctricas del país, con igualdad de condiciones operacionales.
- Realizar un análisis profundo de este material por parte de la entidad implicada para su futura inclusión en los planes de inversión de la entidad.
- Calcular los valores de huella ecológica en hectáreas sembradas de bosques necesaria para mitigar el daño por emisiones.
- Calcular y comparar los resultados de las metodologías de Veziroglu, Vizcón y Ocañas con los obtenidos en este documento para trabajos posteriores en la entidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1- Nag, P. K. (2014). *Power Plant Engineering*. 4ta ed, McGraw Hill Education (India) Private Limited, New Delhi, pp. 1.
- 2- Mira-Osuna, G. (2015). *Diseño de central térmica de ciclo convencional*. (Tesis Doctoral), Universidad de Salamanca, Salamanca.
- 3- Cruzado-Ramírez, R. (2021) Dimensionamiento y selección de una planta termoeléctrica a gas natural para la ciudad universitaria de la UNT, (tesis de maestría), Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo.
- 4- Blanco, J. M., Peña, F. (2011). Incremento de la eficiencia en centrales termoeléctricas por aprovechamiento de los gases de la combustión. *Información Tecnológica*, 22(4), 15-22.
- 5- Pérez-Reyes, G. I. (2016). *Reconversión de una planta termoeléctrica convencional en una central de ciclo combinado*. Universidad Nacional de Ingeniería, Nicaragua, pp. 3.
- 6- Méndez, J., Bezama, A. (2011). Estimación de las emisiones de GEI asociadas al ciclo de vida de la generación termoeléctrica del sistema interconectado central. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias ambientales*, Vol. 4, No. 1, 94 – 102.
- 7- Niño-Rodríguez, C. A. (2018). Gestión del riesgo ambiental: proceso de generación de emisiones contaminantes en la termoeléctrica a base de carbón del municipio de Paipa, *Fundación universidad de américa facultad de educación permanente y avanzada especialización en gestión ambiental*. Bogotá.
- 8- Cortés, S., Yohannessen., K., Tellerías, L., Ahumada, E. (2019). Exposición a contaminantes provenientes de termoeléctricas a carbón y salud infantil: ¿Cuál es la evidencia internacional y nacional? *Revista Chilena de Pediatría*, 90(1):102-114.
- 9- Cuesta-Santos, O., et al. (2017). Inventario nacional de emisiones atmosféricas de las principales fuentes fijas. *Revista Cubana de Meteorología*, Vol.23, No.2, pp. 178-190.
- 10- Lara-Arzate, J., et al. (2012). *Huella ecológica, datos y rostros*. 1ra ed, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México D.F.
- 11- Muhammad, A., Muhammad, Z., Ullah, A., Muhammad, R., Ramzan, N. (2021). Thermo-economic analysis of integrated gasification combined cycle co-generation

- system with carbon capture and integrated with absorption refrigeration system. *Energy Conversion and Management*, 248, 114782.
- 12-Camaraza-Medina, Y. (2020). Current Trends in Cuba on the Environmental Impact and Sustainable Development. *Italian Journal of Engineering Science*, Vol. 64, No. 1, pp. 103-108.
- 13-Rubio, A., (2011). *Generadores de vapor, Funcionamiento y explotación*. Editorial Feijóo, Santa Clara, pp. 1.
- 14-Liu, Z., A-Karimi, I. (2018). *Energy Conversion and Management*. Editorial Elsevier, Oxford.
- 15-Zhang, D., (2013). *Ultra-Supercritical Coal Power Plants*, Editorial Elsevier, New York.
- 16-Di-Gianfrancesco, A., (2017). *Materials for Ultra-Supercritical and Advanced Ultra-Supercritical Power Plants*, Editorial Elsevier, pp. 1-49.
- 17-Rubio, A., (2015). *Generadores de vapor, Funcionamiento y explotación*. Editorial Feijóo, Santa Clara, pp. 3-6.
- 18-Rubio, A., (2019). *Generadores de vapor, Funcionamiento y explotación*. Editorial Feijóo, Santa Clara, pp. 15-17.
- 19-Estensoro-Saavedra, F., et al. (2011). *Energía y medio ambiente. Una ecuación difícil para América Latina: los desafíos del crecimiento y desarrollo en el contexto del cambio climático*. Editorial IDEA-USACH, Santiago de Chile, pp. 9-14.
- 20-Cuesta-Santos, O., et al. (2017). Inventario nacional de emisiones atmosféricas de las principales fuentes fijas. *Revista Cubana de Meteorología*, Vol.23, No.2
- 21-Cuesta-Santos, O., et al. (2017). Inventario nacional de emisiones atmosféricas de las principales fuentes fijas. *Revista Cubana de Meteorología*, Vol.23, No.2, pp. 179.
- 22-Rodríguez-Ávila, R., (2020). *Diseño e implementación del sistema de monitoreo de la condición termodinámica de la instalación de turbina en la Central Termoeléctrica Antonio Guiteras*. Universidad de Matanzas, Matanzas, pp. 18.
- 23- Cuesta-Santos, O., et al. (2017). Inventario nacional de emisiones atmosféricas de las principales fuentes fijas. *Revista Cubana de Meteorología*, Vol.23, No.2, pp. 189.

- 24- Rodríguez-Ávila, R., (2020). *Diseño e implementación del sistema de monitoreo de la condición termodinámica de la instalación de turbina en la Central Termoeléctrica Antonio Guiteras*. Universidad de Matanzas, Matanzas, pp. 20.
- 25- Camaraza-Medina, Y. (2020). Current Trends in Cuba on the Environmental Impact and Sustainable Development. *Italian Journal of Engineering Science*, 64(1), 107-110.
- 26- Amen, T., et.al. (2011). *Un pie grande en un planeta pequeño? Haciendo cuentas con la huella ecológica*. Colección La sostenibilidad tiene muchos rostros. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) / Global Footprint Network, Alemania.
- 27- Lara-Arzate, J., et al. (2012). *Huella ecológica, datos y rostros*. 1ra ed, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México D.F. pp. 5-6.
- 28- Bueno, E., (2012). *Nuestra huella ecológica*. Centro Nacional de Educación Ambiental del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, España.
- 29- World Wide Fund for Nature (WWF). *Planeta Vivo*. Informes Del 2012.
- 30- Lara-Arzate, J., et al. (2012). *Huella ecológica, datos y rostros*. 1ra ed, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México D.F. pp. 7.
- 31- Lara-Arzate, J., et al. (2012). *Huella ecológica, datos y rostros*. 1ra ed, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México D.F. pp. 15.
- 32- Cuza, O., Influencia del cambio de combustible en el generador de vapor de una CTE de 500 MW. (M.Sc. Tesis), Universidad de Moa, Cuba, 2011.
- 33- Ganjehkaviri, A., et al. Modeling and optimization of combined cycle power plant based on exergoeconomic and environmental analyses, *Appl. Therm. Eng.* 67 (1) (2014) 566–578, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.03.018>.
- 34- Yafeng Han, Bo Shen, Tong Zhang, A techno-economic assessment of fuel switching options of addressing environmental challenges of coal-fired industrial boilers: an analytical work for China, *Energy Procedia* 142 (2017) 3083–3087, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.448>.
- 35- Retirado-Mediaceja, Y., Camaraza-Medina, Y., Sánchez-Escalona, A., Laurencio-Alfonso, H., Salazar-Corrales, M., Zalazar-Oliva, C. Thermo-exergetic assessment of

- the steam boilers used in a Cuban thermoelectric facility, *IJDNE* 15 (3) (2020) 291–298, <https://doi.org/10.18280/ijdne.150302>.
- 36- Calvo-González, A.E., et al. Cálculo térmico normativo de calderas digitalizado para análisis de regímenes estacionarios, *Ingeniería Mecánica* 22 (2) (2019) 100–107.
- 37- Arshad, A., et al.(2019) Energy and exergy analysis of fuel cells: a review, *Therm. Sci. Eng. Progr.* 9 308–321, <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.12.008>.
- 38- Camaraza-Medina, Y. (2020) *Introducción a la termotransferencia*, 2da edición, Editorial Universitaria, La Habana.
- 39- Kilkis, B.(2019) Development of an exergy-rational method and optimum control algorithm for the best utilization of the flue gas heat in coal-fired power plant stacks, *Energies* 12 (4) 760, <https://doi.org/10.3390/en12040760>.
- 40- Burners, R. *Forced draught burner handbook*, RielloS.p.A, Legnago-Italy, 2020.
- 41- Camaraza-Medina, Y., et al. (2017) Analysis of pressure influence over heat transfer coefficient on air cooled condenser, *Journal Européen des Systèmes Automatisés* 50 (3) 213–226, <https://doi.org/10.3166/jesa:50.213-226>.
- 42- Centeno-González, F. O., et al. CFD modeling of combustion of sugarcane bagasse in an industrial boiler, *Fuel* 193 (2017) 31–38, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.11.105>.
- 43- Sobota, T. (2018). Improving steam boiler operation by on-line monitoring of the strength and thermal performance, *Heat Transfer Engineering*. 39, 1260–1271, <https://doi.org/10.1080/01457632.2017.1363641>.
- 44- Edmonds, W., Kennedy, T. (2017) *An applied guide to research designs: quantitative, qualitative, and mixed methods*, SAGE Publications, Los Ángeles.
- 45- Veziroglu, T. (1998) *Environmental damage for energy use*, International Association for Hydrogen Energy. Coral Gables.
- 46- Vizcón-Toledo, R., López-Ripoll, N. (2020) Diagnostico termodinámico de sistemas energéticos. Monografías, Universidad de Matanzas.
- 47- Ocañas, G. V. (2006) *Procedimiento para la valoración de la sostenibilidad energético*. Universidad Central de Villa Clara "Marta Abreu", Villa Clara.
- 48- Vizcón-Toledo, R. (2013) *Tecnologías Energéticas Avanzadas*. Curso de posgrado. Universidad de Matanzas " Camilo Cienfuegos", Matanzas.

- 49- Vizcón-Toledo, R. (2018) *Energía y medio Ambiente*. Curso de posgrado. Maestría de Producción más Limpia. Universidad de Matanzas " Camilo Cienfuegos". Matanzas.
- 50- Camaraza-Medina, Y., et al. (2021) Energy efficiency indicators of the steam boiler in a power plant of Cuba, *Thermal Science and Engineering Progress*, 23, 100880, <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2021.100880>.
- 51- OFICINA NACIONAL DE ESTADÍSTICAS DE CUBA. (31 de 12 de 2016). anuario estadístico cubano. Recuperado el 15 de marzo de 2018, de www.one.cu
- 52- Camaraza-Medina, Y. (2019) *Métodos para la determinación de los coeficientes de transferencia de calor en aerocondensadores que operan en centrales eléctricas de biomasa*. (Tesis doctoral), Universidad Central “MartaAbreu” de Las Villas, Cuba.
- 53- Asdrubali, B. G. (2015). Comparative life Cycle assessment of an air-cooled condenser system and Conventional condensers. *Fuel*, 155, 101-115.
- 54- Söshret, S. H. (2017) Sustainability Assessment and improvement performance of an air-cooled condenser in power plant: Exergy-Based Method, in Energy solution to combat global warming. pp.1451.
- 55- Ganapathy,V. (2013) Industrial Boilers and Heat Recovery Steam Generators: Design, Applications and Calculations. Marcel Dekker, Inc., New York.
- 56- Camaraza-Medina, Y., et al. (2019). Mathematical deduction of a new model for calculation of heat transfer by condensation inside pipes, *Int. J. Heat Mass Transfer* 141 180–190, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.06.076>.
- 57- Camaraza-Medina, Y., et al. (2018). Mathematical modeling of two-phase media heat transfer coefficient in air cooled condenser systems, *IJHT* 36 (1) 319–324, <https://doi.org/10.18280/ijht.360142>
- 58- Camaraza-Medina, Y., Hernandez-Guerrero, A., Luviano-Ortiz, J.L. (2020). Comparative study on heat transfer calculation in transition and turbulent flow regime inside tubes, *Latin Am. Appl. Res.* 50 (4) 309–314.
- 59- Camaraza-Medina, Y., Sánchez-Escalona, A., Retirado-Mediaceja, Y., García-Morales, O. (2020). Use of air cooled condenser in biomass power plants: a case study in Cuba, *IJHT* 38 (2) 425–431, <https://doi.org/10.18280/ijht.380218>.