



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

DIRECCIÓN DE POSGRADO

Proyecto de Investigación y Desarrollo en opción al Grado Académico de
Magister en Gestión de Energías

TEMA:

EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE PARÁMETROS OPERACIONALES
EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA WÄRTSILÄ W18V32
UTILIZADOS PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN
EL BLOQUE 12 OPERADO POR PETROAMAZONAS EP, DURANTE
EL AÑO 2016. GENERACIÓN DE UN PROCEDIMIENTO PARA LA
OPERACIÓN EFICIENTE.

Autora:

URBINA Muñoz, María Elizabeth

Tutor:

Ph.D. Héctor Luis Laurencio Alfonso

LATACUNGA – ECUADOR

Octubre - 2017

AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento especial a la empresa que me brindó una base confiable de estudio para la investigación. Reconocer también a la Dirección de Posgrado de la Universidad Técnica de Cotopaxi por el soporte técnico y académico en la Maestría en Gestión de Energías.

Agradezco y destaco el apoyo de mi tutor Ph.D Héctor Luis Laurencio Alfonso por la dirección, exigencia y crítica en la presente investigación.

Un profundo agradecimiento a mi gran amigo Ph.D Yoalbys Retirado Mediaceja persona de gran sabiduría por su valiosa guía y revisión del trabajo de investigación.

A mi familia por su apoyo incondicional y que con la bendición de Dios son el pilar fundamental de mi vida.

María Elizabeth Urbina Muñoz

DEDICATORIA

A mi esposo Fidel, con quien nos embarcamos en este viaje en el mundo personal y profesional, que soñamos y planeamos lograr grandes cosas, que vamos subiendo cada escalón de la mano sin dejar que nada nos distraiga de las metas, su apoyo es infinito como su amor.

A mis hijos Luz y Fidel que me cambiaron la vida, que día a día me enseñan a ser madre y a completar mi formación humana; a recibir el amor a montones a cambio de una sonrisa sincera cuando corren a mis brazos. Hoy vivo para ellos.

A mis padres Carlos y Virginia que me entregaron lo mejor de su vida, me formaron a su imagen y hoy soy lo que soy gracias a ellos. Tengo la gran bendición de tenerlos junto a mí y a mis hijos.

A mi hermano Carlos y mis sobrinas Carla y Ariana por sus grandes manifestaciones de afecto que alegran mi vida.

María Elizabeth Urbina Muñoz

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE	Pág.
AVAL DEL TRIBUNAL DE GRADO	-I-
CERTIFICADO DE VALIDACIÓN DEL TUTOR	-II-
AUTORÍA DE TESIS	-III-
AGRADECIMIENTOS	-IV-
DEDICATORIA	-V-
ÍNDICE GENERAL	-VI-
ÍNDICE DE TABLAS	-X-
ÍNDICE DE FIGURAS	-XII-
RESUMEN	-XIV-
ABSTRACT	-XV-
INTRODUCCIÓN.	-01-
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO Y CONTEXTUAL PARA LA EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA WÄRTSILÄ W18V32.	-10-
1.1- Introducción al capítulo.	-10-
1.2- Marco legal referente a la generación eléctrica y la producción de hidrocarburos.	-10-
1.2.1- Regulaciones establecidas por el CONELEC.	-13-
1.2.2- Consideraciones especiales para los autogeneradores en sistemas aislados.	-15-
1.3- Resumen del estado del arte sobre los motores de combustión interna.	-16-
1.4- Trabajos precedentes sobre motores de combustión interna.	-18-
1.4.1- Transferencia de calor en motores de combustión interna.	-23-
1.4.2- Trabajos precedentes realizados en Ecuador.	-24-
1.5- Generalidades de la generación eléctrica en plantas diésel.	-26-

1.6- Particularidades de las centrales eléctricas fabricadas por la empresa Wärtsilä.	-29-
1.6.1- Sistema eléctrico y automático en la central eléctrica Wärtsilä.	-32-
1.6.2- Conjunto motor-generator Wärtsilä.	-33-
1.7- Eficiencia de los grupos electrógenos.	-34-
1.8- Conclusiones del capítulo 1.	-35-
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS USADOS PARA LA EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA WÄRTSILÄ W18V32.	-37-
2.1- Introducción al capítulo.	-37-
2.2- Localización geográfica del campo Edén Yuturi.	-37-
2.3- Particularidades de los motores Wärtsilä W18V32.	-38-
2.3.1- Diseño general del motor.	-38-
2.4- Determinación y operacionalización de variables.	-41-
2.4.1- Interpretación causa – efecto.	-32-
2.4.2- Matriz de operacionalización de variables.	-43-
2.5- Método de cálculo para la evaluación energética de los motores Wärtsilä W18V32.	-45-
2.5.1- Método de cálculo para parámetros indicados, efectivos y pérdidas mecánicas.	-49-
2.6- Técnicas de medición utilizadas.	-55-
2.6.1- Tipo de experimento realizado.	-56-
2.7- Conclusiones del capítulo 2.	-57-
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LA EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA WÄRTSILÄ W18V32. CASO DE ESTUDIO MOTOGENERADOR ZAN-110.	-58-
3.1- Introducción al capítulo.	-58-
3.2- Principales parámetros medidos en el motogenerador Wärtsilä W18V32.	-58-

3.3-	Resultados obtenidos en la evaluación energética del MCI-10.	-62-
3.4-	Comportamiento de los parámetros energéticos fundamentales.	-64-
3.4.1-	Comportamiento de los flujos de calor.	-64-
3.4.2-	Comportamiento de los rendimientos.	-67-
3.4.3-	Comportamiento de los consumos específicos.	-68-
3.4.4-	Otros parámetros de interés calculados durante la evaluación energética.	-69-
3.5 -	Incidencia de los parámetros principales de los motores en los equipos electrógenos.	-70-
3.6-	Valoración económica asociada al trabajo de los MCI en la planta térmica No. 2.	-72-
3.7-	Afectaciones ambientales asociadas al trabajo de los MCI en la planta térmica No. 2.	-74-
3.7.1-	Agentes contaminantes del medio ambiente en los MCI.	-76-
3.8-	Conclusiones del capítulo 3.	-79-
CAPÍTULO 4.	PROPUESTA DE UN PROCEDIMIENTO PARA LA OPERACIÓN EFICIENTE DE LOS MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA WÄRTSILÄ W18V32.	-80-
4.1-	Introducción al capítulo.	-80-
4.2-	Título de la propuesta.	-80-
4.3-	Justificación de la propuesta.	-82-
4.4-	Objetivo de la propuesta.	-82-
4.5-	Estructura de la propuesta.	-83-
4.5.1-	Particularidades de la TGTEE.	-89-
4.5.2-	Particularidades de la norma ISO 50001.	-90-
4.6-	Desarrollo de la propuesta.	-90-
4.6.1-	Determinación del consumo específico de crudo de los MCI.	-98-
4.6.2-	Reevaluación energética de los MCI de la planta de generación.	-98-
4.6.3-	Aplicación de herramientas de la TGTEE en las plantas térmicas No. 1 y 2.	-104-

4.6.4- Aplicación de herramientas de la norma ISO 50001 en las plantas térmicas.	-107-
4.7- Consideraciones sobre la valoración económica, social y ambiental de la propuesta.	-107-
4.8- Conclusiones del capítulo 4.	-107-
CONCLUSIONES GENERALES.	-109-
RECOMENDACIONES.	-111-
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	-112-
BIBLIOGRAFÍA.	- 119-
ANEXOS.	-XVI-

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Límites máximos para las propiedades de los combustibles fósiles.	-41-
Tabla 2.2. Matriz de operacionalización de variables.	-44-
Tabla 3.1. Parámetros de funcionamiento medidos y/o calculados en el MCI-10.	-59-
Tabla 3.2. Propiedades termofísicas y químicas del crudo utilizado en el MCI-10.	-60-
Tabla 3.3. Análisis químico de los gases producto de la combustión del MCI-10.	-61-
Tabla 3.4. Parámetros meteorológicos medidos en el Campo Edén Yuturi del Bloque 12.	-62-
Tabla 3.5. Resultados de los parámetros fundamentales obtenidos en el MCI-10.	-63-
Tabla 3.6. Producción de potencia de los MCI de la planta de generación No. 2.	-70-
Tabla 3.7. Gasto económico mensual asociado a la energía producida en la planta No. 2.	-73-
Tabla 3.8. Gasto económico anual asociado a la energía producida en la planta No. 2.	-73-
Tabla 3.9. Detalles relativos a la medición de emisiones en los MCI.	-75-
Tabla 3.10. Resultados de las emisiones en los MCI de la planta de generación No.2.	-75-
Tabla 3.11. Resultados de las emisiones de gases en el MCI-10 de la planta de generación No. 2.	-76-
Tabla 4.1. Cálculo comparativo del consumo específico de combustible.	-93-
Tabla 4.2. Cálculo verificativo del consumo específico de combustible.	-94-
Tabla 4.3. Resumen de los cálculos realizados a los MCI Wärtsilä W18V32 (09 y 13).	-97-
ANEXOS	-XIV-

Tabla 1. Costos externos estimados en base a que se duplique o triplique el CO₂ en la atmósfera.

-XXV-

Tabla 2. Costos externos estimados según la tecnología empleada.

-XXVI-

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Evolución de la oferta de energía en Ecuador (periodo 1970 -2014).	-11-
Figura 1.2.	Potencia efectiva instalada en Ecuador (periodo 1970 -2014).	-12-
Figura 1.3.	Aspectos energéticos de diferentes tecnologías de plantas eléctricas.	-28-
Figura 1.4.	Soluciones modulares de centrales eléctricas Wärtsilä.	-30-
Figura 1.5.	Módulos auxiliares en las centrales eléctricas Wärtsilä.	-31-
Figura 1.6.	Conjunto motor-generador de una central Wärtsilä.	-34-
Figura 2.1.	Mapa Geopolítico de la región donde está campo Edén Yuturi.	-38-
Figura 2.2.	Matriz causa – efecto: árbol de problemas asociado al objeto de estudio.	-42-
Figura 2.3.	Sistema de adquisición de datos empleado en la planta de generación.	-55-
Figura 3.1.	Comportamiento de los calores presentes durante el trabajo del MCI-10.	-65-
Figura 3.2.	Comportamiento de los calores vs. potencia calorífica del combustible.	-66-
Figura 3.3.	Comportamiento de los rendimientos del MCI-10.	-67-
Figura 3.4.	Comportamiento de los consumos específicos de combustible en el MCI-10.	-68-
Figura 3.5.	Comportamiento del consumo específico de crudo, calculado según la norma ISO 3046.	-69-
Figura 3.6.	Comportamiento de la producción de potencia (promedio) en los equipos electrógenos.	-71-
Figura 3.7.	Comportamiento de la producción de energía en los equipos electrógenos.	-72-
Figura 4.1.	Causas del bajo nivel en gestión energética existente en la planta de generación eléctrica No. 2 de la empresa Petroamazonas EP.	-85-
Figura 4.2.	Algoritmo para la aplicación de la TGTEE en la empresa Pretoamazonas EP.	-86-

Figura 4.3.	Esquema general del sistema de monitoreo y control energético que se recomienda aplicar en la empresa Pretoamazonas EP.	-88-
Figura 4.4.	Consumo específico de combustible del MCI-09, según las normas ISO 15550 y 3046.	-94-
Figura 4.5.	Consumo específico de combustible vs. potencia efectiva del MCI-09.	-96-
Figura 4.6.	Estructura de consumo de portadores energéticos durante el año 2016.	100-
Figura 4.7.	Consumos (crudo, gas y aceite Argina) y producción de energía vs. tiempo	-102-
Figura 4.8.	Índice de consumo vs. producción en el tiempo.	103-
Figura 4.9.	Consumo de combustible considerando las plantas No. 1 y 2.	104-
Figura 4.10.	Consumo de combustible considerando solo la planta No. 2.	105-
Figura 4.11.	Índice de consumo de combustible considerando las dos plantas.	106-
Figura 4.12.	Índice de consumo de combustible considerando solo la planta No. 2.	106-
ANEXOS		-XVI-
Figura 1.	Prueba de consumo específico de crudo practicada por la compañía Wärtsilä al Motor de Combustión Interna W18V32 (el MCI No. 9 de la planta de generación térmica).	XVII-
Figura 2.	Prueba de consumo específico de crudo practicada por la compañía Wärtsilä al Motor de Combustión Interna W18V32 (el MCI No. 13 de la planta de generación térmica).	XVIII-
Figura 3.	Flujograma para la implementación del modelo de sistema de gestión de la energía para la norma ISO 50001.	-XXII-

TEMA: EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE PARÁMETROS OPERACIONALES EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA WÄRTSILÄ W18V32 UTILIZADOS PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN EL BLOQUE 12 OPERADO POR PETROAMAZONAS EP, DURANTE EL AÑO 2016. GENERACIÓN DE UN PROCEDIMIENTO PARA LA OPERACIÓN EFICIENTE.

Autora: María Elizabeth Urbina Muñoz

RESUMEN

En la planta de generación eléctrica W32, emplazada en el campo Edén Yuturi del Bloque 12 de la empresa Petroamazonas EP, se explotan seis motores de combustión interna Wärtsilä W18V32. Sin embargo, a la fecha, no se les han realizado diagnósticos energéticos a los equipos. Para resolver esta problemática se desarrolla la presente investigación, con el objetivo de evaluar energéticamente los parámetros fundamentales de operación de los motogeneradores, durante el año 2016. Para ello se desarrolló el marco teórico-contextual que sustenta a la investigación, se establecieron los procedimientos para el balance térmico de los motores y se obtuvieron los datos experimentales necesarios para el análisis termoenergético de las máquinas térmicas. La evaluación energética del motor seleccionado, el ZAN-110, corroboró que en el mismo se aprovechó adecuadamente el calor porque convirtió en potencia efectiva el 41,13 % de la energía térmica disponible en el crudo y los rendimientos indicado y mecánico promedios alcanzaron el 50,83 y 81,75 %, respectivamente. Además, se comprobó que el motogenerador tiene gran incidencia en la operación de los equipos electrógenos debido a que consumió el 16,20 % del dinero gastado en la producción de energía eléctrica en la planta, con las consiguientes emisiones de gases contaminantes al ambiente. Finalmente, se propone un procedimiento para la operación eficiente de los motores Wärtsilä W18V32, basado en la aplicación de herramientas de la Tecnología de Gestión Total Eficiente de la Energía y la norma ISO 50001.

Palabras claves: Evaluación energética, Parámetros fundamentales de operación, Motores de combustión interna, Motogeneradores Wärtsilä W18V32, procedimiento para la operación eficiente.

THEME: ENERGY EVALUATION OF OPERATIONAL PARAMETERS IN WÄRTSILÄ W18V32 INTERNAL COMBUSTION ENGINES USED FOR THE GENERATION OF ELECTRICITY IN BLOCK 12 OPERATED BY PETROAMAZONAS EP, DURING THE YEAR 2016. GENERATION OF A PROCEDURE FOR EFFICIENT OPERATION.

Author: María Elizabeth Urbina Muñoz

ABSTRACT

Located in the Eden Yuturi field of Block 12 of the Petroamazonas EP company, the W32 electric generation plant exploits six Wärtsilä W18V32 internal combustion engines. However, to date, there have been no energy diagnostics to the engines. In order to solve this problem, the present research is developed, with the objective of evaluating the fundamental parameters of operation of the motor generators, during the year 2016. For this purpose, the theoretical-contextual framework that underpinned the research was developed. The thermal balance of the motors and the experimental data necessary for the thermoenergetic analysis of the thermal machines were obtained. The energy evaluation of the selected engine, ZAN-110, corroborated that the heat was adequately harnessed because it converted 41,13 % of the available thermal energy in the crude oil and the indicated, mechanical and effective yields averages reached the 50,83 and 81,75 %, respectively. In addition, it was verified that the motor generator has a great incidence in the operation of the generating equipment because it consumed 16,20 % of the money spent in the production of electrical energy in the plant, with the consequent emissions of polluting gases to the environment. Finally, a procedure is proposed for the efficient operation of Wärtsilä W18V32 engines, based on the application of tool of the Total Efficient Energy Management Technology and the norm ISO 50001.

Keywords: Energy evaluation, operating parameters, Internal combustion engines, Wärtsilä W18V32 motor generators, procedure for efficient operation.

INTRODUCCIÓN

La energía eléctrica es una de las formas más usadas de la energía en el mundo. La misma juega un rol extremadamente relevante en las sociedades contemporáneas y, por consiguiente, marca o mide el desarrollo de un país. En la actualidad existen varios tipos de centrales de generación eléctrica, entre ellas se encuentran: las hidroeléctricas, nucleares, eólicas, mareomotriz, geotérmica, térmicas a vapor y a combustión, entre otras (Schallenberg *et al.*, 2008).

Las centrales de generación térmica con Motores de Combustión Interna (MCI), en últimos años han tenido un gran crecimiento, especialmente en países desarrollados y en otros que no cuentan con los recursos tradicionales para generar electricidad. En Ecuador a partir del año 2002 se ha venido incrementando en gran medida las centrales de generación térmica, mediante motores de combustión interna, especialmente en la industria petrolera. Esta tecnología resulta la más idónea para la referida industria por su ubicación geográfica (muy alejada de las ciudades electrificadas) y las bondades que tienen en cuanto al aprovechamiento del combustible (petróleo crudo).

En este sentido, y de acuerdo con Rodríguez (2016), el sector petrolero constituye el mayor productor de portadores energéticos a nivel nacional, por lo que ocupa en Ecuador un lugar importante en los lineamientos para la economía. Al respecto, resulta evidente que la adecuada explotación de las máquinas térmicas empleadas en la generación de electricidad (los motores de combustión interna) y otros equipos electromecánicos presentes en las instalaciones petroleras industriales, así como el uso racional de los portadores energéticos disponibles, inciden considerablemente en la reducción de los costos productivos.

En Ecuador son varias las empresas que se dedican a la producción de petróleo, entre las más importantes se encuentra Petroamazonas EP. La misma cuenta con un gran número de unidades de generación eléctrica con motores de combustión interna en diferentes campos, y es la pionera en realizar mejoras de optimización de las operaciones y de cuidado al medioambiente.

En el bloque 12 la empresa Petroamazonas EP cuenta con dos centrales de generación térmica centralizadas en el campo Edén Yuturi. Las instalaciones abastecen la demanda

de electricidad de las facilidades de EPF (*Eden Production Facilities*), campamentos, plataformas de producción del sector y de las plataformas de producción de Dumbique, Yanahurco, Pañacocha. Además, se estima que en poco tiempo también suministren energía a otros sectores (bloques) productivos.

En la planta de generación térmica No. 2 se cuenta con seis motogeneradores marca Wärtsilä W18V32 de 8,1 MW de potencia cada uno. No obstante, los motores de combustión operan con una carga promedio de 7-7,2 MW y en ocasiones inferior, lo cual está asociado a la premura en la puesta en operación debido a la necesidad operativa que tenía la empresa de cubrir la demanda energética. Lo anterior, provocó que en las tres fases constructivas la entrega y recepción entre “vendedor-cliente” presentara algunas dificultades en relación con los protocolos de prueba y el seguimiento permanente de los equipos, con los inconvenientes que generan estas circunstancias.

Por otra parte, a la fecha no se ha realizado una evaluación energética de los motores Wärtsilä W18V32, a pesar de que cada motogenerador presenta diferentes valores en sus parámetros operativos y que, además, están presentando los siguientes problemas: deterioro acelerado de elementos de máquina como turbocargadores, daños en asientos de válvulas de escape, paros de bombas de inyección de combustible, altas vibraciones, elevadas temperaturas de gases de escapes, defecto en la inyección de combustible (curva atípica), variaciones de frecuencia y potencia reactiva, entre otros. Tales deficiencias, unido a la gran importancia estratégica que tienen los motores antes mencionados, imponen la necesidad de evaluar energéticamente a los motogeneradores en las diversas condiciones de explotación por las que transitó la planta, durante el año 2016. Este aspecto constituye uno de los propósitos fundamentales de la presente investigación.

En este escenario se enmarca la **situación problemática**, argumentada a partir de los siguientes planteamientos:

En las facilidades petroleras a nivel mundial, la energía eléctrica constituye el principal recurso para la operación de extracción, separación, bombeo y transporte de petróleo. La importancia en el control de los parámetros de funcionamiento de los grupos electrógenos es esencial en la operación eficiente de generación de electricidad.

En el campo Edén Yuturi, como se ha indicado con anterioridad, se cuenta con dos plantas de generación eléctrica centralizada. En la planta de generación eléctrica W32, con el fin de ahorrar portadores energéticos, se implementó un sistema de recuperación de calor (de cogeneración) que consiste en aprovechar la energía térmica de los gases de escape de los motogeneradores Wärtsilä W18V32 para calentar el aceite térmico que está recirculando en un circuito cerrado. Además, mediante intercambiadores de calor se calienta el fluido multifásico proveniente de las locaciones remotas al ingreso del proceso, con lo cual se mejora la eficiencia en el empleo de la energía térmica disponible en los gases de escape. Lo anterior, reduce la cantidad de combustible empleado en la combustión y, en consecuencia, las emisiones de Monóxido de Carbono (CO) y Dióxido de Carbono (CO₂) asociadas a la quema de combustibles fósiles, en este caso petróleo crudo.

El impacto que producen, en los motogeneradores Wärtsilä W18V32, las modificaciones tecnológicas introducidas en la planta de generación eléctrica W32 (a pesar de que las mismas están orientadas en la dirección correcta porque potencian el ahorro de portadores energéticos) no ha sido analizado con rigor. Actualmente, la planta no dispone de evaluaciones energéticas actualizadas sobre los motores.

JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN:

Las industrias que implementan las normas de calidad o practican las buenas prácticas productivas, acostumbran a evaluar periódicamente el comportamiento de los equipos fundamentales (como son los motogeneradores en las plantas de generación eléctrica) en cuanto a mantenimiento y desempeño energético (rendimientos térmico y consumo de portadores energéticos). Esto le permite conocer dinámicamente los parámetros de funcionamiento que pueden ser mejorados en poco tiempo.

La empresa Petroamazonas EP, constituye un referente positivo en el sector petrolero ecuatoriano, por considerar entre sus altas prioridades los estándares en cuanto a calidad, cumplimiento de normativas legales, y la responsabilidad social y con el medioambiente. En este sentido, la entidad productiva estimula a sus ingenieros y técnicos a desarrollar e implementar investigaciones que contribuyan a explotar racionalmente los equipos e instalaciones que la integran. Por lo tanto, se considera práctico y oportuno desarrollar la

evaluación de los parámetros operaciones de los motores de combustión interna Wärtsilä W18V32 utilizados para la generación de energía eléctrica del bloque 12 operado por la empresa, para las condiciones de explotación del año 2016.

DELIMITACIÓN PROBLEMA Y OBJETO:

El problema a investigar queda delimitado a los motores de combustión interna Wärtsilä W18V32 utilizados para generación de energía eléctrica del bloque 12 operado por la empresa Petroamazonas EP, durante el año 2016.

Teniendo en cuenta la situación problemática antes mencionada, se declara el siguiente **problema de investigación:**

¿Cómo inciden los principales parámetros de funcionamiento de los motores de combustión interna Wärtsilä W18V32 en la operación de los equipos electrógenos explotados por la empresa Petroamazonas EP, para la generación eléctrica en el campo Edén Yuturi del Bloque 12?

El **objeto de estudio** de la investigación son los motores de combustión interna Wärtsilä W18V32.

OBJETIVO GENERAL Y CAMPO DE ACCIÓN:

En correspondencia con el problema de investigación declarado, se define como **objetivo general:**

Evaluar energéticamente los parámetros fundamentales de funcionamiento de los motores de combustión interna Wärtsilä W18V32, durante el año 2016, y su incidencia en la operación de los equipos electrógenos explotados por la empresa Petroamazonas EP, para la generación eléctrica en el campo Edén Yuturi del Bloque 12.

Y se establece como **campo de acción** del trabajo:

La evaluación energética de los principales parámetros de funcionamiento (los calores generados, los rendimientos indicado, mecánico y efectivo; y las pérdidas mecánicas) de los motores de combustión interna Wärtsilä W18V32, durante el año 2016.

A partir del problema y el objetivo general declarados, se establece la siguiente **hipótesis:**

La aplicación al objeto de estudio de métodos de cálculo establecidos para el análisis energético de motores de combustión interna, conjugado con la implementación de herramientas de la Tecnología de Gestión Total Eficiente de la Energía (TGTEE) y la norma ISO 50001; permitirá la evaluación energética de los principales parámetros de funcionamiento de los motogeneradores, durante el año 2016; la determinación de la incidencia que estos tienen en el trabajo de los equipos electrógenos explotados por Petroamazonas EP, para la generación eléctrica en el campo Edén Yuturi del Bloque 12; y posibilitará la generación de un procedimiento para la operación eficiente de los motores Wärtsilä W18V32.

Para dar cumplimiento al objetivo general se declara el **siguiente sistema de objetivos específicos**:

1. Desarrollar el marco teórico y contextual necesario para el estudio energético del objeto de estudio, a partir de la sistematización del conocimiento científico precedente.
2. Definir materiales y métodos adecuados para la evaluación energética de los principales parámetros de funcionamiento de los motores Wärtsilä W18V32, mediante la adecuación de los procedimientos generales establecidos en la literatura científica.
3. Analizar los resultados obtenidos en la evaluación energética de los motogeneradores Wärtsilä W18V32, a través del estudio del comportamiento de sus principales parámetros.
4. Proponer un procedimiento para la operación eficiente de los motores de combustión interna Wärtsilä W18V32, tomando como referencia los resultados de la presente investigación.

Para garantizar el cumplimiento de los objetivos (general y específico) y la solución del problema investigado se desarrolla el siguiente **sistema de tareas**:

1. Revisión de la literatura científica relacionada con los motores de combustión interna, la generación eléctrica con plantas diésel, los equipos electrógenos y otras temáticas afines.

2. Análisis de las características más importantes de los motores Wärtsilä W18V32 y el funcionamiento energético de los mismos.
3. Adecuación, al objeto de estudio, de los métodos de cálculo generales establecidos para el análisis energético de los motores de combustión interna.
4. Desarrollo de las mediciones experimentales necesarias para la evaluación energética de los motores Wärtsilä W18V32.
5. Diagnóstico energético y cálculo de los parámetros fundamentales de funcionamiento de los motores investigados.
6. Valoración técnica, económica y ambiental asociada al trabajo de los motores de combustión interna Wärtsilä W18V32.
7. Generación del procedimiento para la operación eficiente de los equipos electrógenos, basado en la aplicación de herramientas de la TGTEE y la norma ISO 50001.

PARADIGMA O ENFOQUE EPISTEMOLÓGICO:

El enfoque de este proyecto tuvo el carácter experimental, cuantitativo y cualitativo. Es experimental debido a que se realiza la observación, registro y análisis de las variables que intervienen en la evaluación energética del objeto de estudio; es cuantitativo porque la investigación de campo se realiza en el lugar donde se desarrolla el proceso de producción de electricidad (Planta de generación térmica No. 2, campo Edén Yuturi del Bloque 12); y es cualitativo, ya que en función de los datos obtenidos y el marco teórico-contextual desarrollado, se realizan inferencias teóricas que son útiles para el análisis de las variables investigadas.

NIVEL O TIPO DE LA INVESTIGACIÓN:

El nivel de una investigación está dado por el grado de profundidad con que se analicen los aspectos fundamentales de la misma. Otro aspecto que influye en el nivel de un trabajo investigativo es el alcance que se logra a su término. De acuerdo con las características de la presente investigación, esta alcanza los niveles de investigación siguientes:

Exploratorio: porque se entra en contacto con la realidad, se desarrolla la observación y el análisis preliminar en el campo, se determinan las relaciones funcionales del objeto de estudio con los restantes elementos de la planta. Además, con la ayuda de ingenieros, técnicos y operadores, se comprendió la esencia del problema investigado, el cual es novedoso y actual.

Descriptivo: porque para el proyecto investigativo fue necesario describir ciertas características generales del proceso de generación de electricidad con motores de combustión interna, identificar parámetros operativos y su comportamiento para diferentes condiciones de operación, a modo de comprobar las relaciones entre las variables fundamentales que se investigaron.

Correlacionado: porque la existencia de trabajos precedentes, conjugada con los datos medidos en campo posibilitó identificar asociaciones entre variables y establecer relaciones estadísticas.

Explicativo: porque se comprueba experimentalmente la hipótesis, es decir; se evalúan energéticamente los parámetros de funcionamiento más importantes de los motogeneradores Wärtsilä W18V32 (consumo de combustible, rendimiento indicado y efectivo), durante el año 2016; y se determina la incidencia que estos tienen en la operación de los equipos electrógenos estudiados.

ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN:

El alcance de la presente investigación consiste en que se implementa un método que permite evaluar energéticamente los parámetros fundamentales de funcionamiento de los motogeneradores Wärtsilä W18V32, y posibilita determinar la incidencia que estos tienen en la operación de los equipos electrógenos explotados por la empresa Petroamazonas EP, para la generación eléctrica en el campo Edén Yuturi del Bloque 12. Además, se genera un procedimiento que al ser implementado en la planta contribuirá a operar eficientemente las instalaciones generadoras de electricidad. Otro aspecto significativo es que se realiza un aporte sustancial para los estudiantes de la Universidad Técnica de Cotopaxi y la sociedad ecuatoriana, proporcionando la información necesaria en lo referente a los principales parámetros de funcionamiento de los motores de combustión utilizados en generación eléctrica.

MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN EMPLEADOS:

Los principales métodos de investigación empleados en el trabajo se exponen a continuación:

Histórico-lógico: para la actualización del estado del arte, a partir del análisis de los trabajos científico-técnicos relacionados con los motores de combustión interna.

Sistémico: para la sistematización de la teoría básica de la termotecnia que resulta de interés para la evaluación energética de los parámetros fundamentales del objeto de estudio.

Inductivo-deductivo: para la determinación de las limitaciones de los trabajos precedentes, al ser aplicados a los motores Wärtsilä W18V32 y para el establecimiento de los procedimientos de cálculo útiles para la evaluación energética de los motogeneradores.

Experimental: para la caracterización del combustible y la obtención de datos experimentales necesarios para la evaluación energética.

Computacional: para el cálculo de los parámetros fundamentales de funcionamiento de los motores de combustión interna y la creación de los gráficos de comportamiento de interés para la investigación.

Estadísticos: para calcular los errores relativos, así como para aplicar las herramientas y procedimientos de la TGTEE y la norma ISO 50001.

BREVE DESCRIPCIÓN DEL CONTENIDO DE LA TESIS

La metodología empleada es novedosa porque conjuga el estudio de la producción de electricidad en la empresa Petroamazonas EP, con la aplicación de la tecnología de gestión total eficiente de la energía para el establecimiento de un procedimiento para la operación eficiente de los equipos electrógenos en la empresa, aspecto aún no logrado. Consta de cuatro etapas de trabajo, congruentes con las utilizadas en otras investigaciones en la Universidad Técnica de Cotopaxi (Quitiaquez, 2015, Santos, 2015; Fassler, 2016; Rodríguez, 2016). Las etapas ejecutadas se exponen a continuación:

Primera etapa (Marco teórico-contextual): se seleccionó el objeto de estudio considerando su importancia estratégica para la empresa Petroamazonas EP. Se determinaron los métodos de investigación a emplear, se realizó el análisis de los trabajos precedentes, y se expuso la teoría básica útil para la evaluación energética de los motores. Los aspectos anteriores, vistos integradamente, constituyen el marco teórico y contextual que sustenta la presente Tesis.

Segunda etapa (Materiales y métodos): se definieron los materiales e instrumentos a emplear en la medición de los parámetros de operación de los motores de combustión interna. Se establecieron procedimientos y métodos de cálculo específicos para la evaluación energética de los motogeneradores Wärtsilä W18V32 explotados en la empresa Petroamazonas EP.

Tercera etapa (Evaluación energética): se realizaron mediciones en los motores Wärtsilä W18V32 y se implementaron los métodos de cálculo en su evaluación energética. Se establecieron los comportamientos de los parámetros fundamentales y se analizaron las tendencias. Luego, se realizó el análisis técnico, económico y ambiental asociado al trabajo de los motogeneradores.

Cuarta etapa (Desarrollo de la propuesta): se desarrolla una propuesta, el procedimiento para la operación eficiente de los equipos electrógenos utilizados en la generación eléctrica en el campo Edén Yuturi del Bloque 12, para ello se implementan herramientas de la TGTEE y la norma ISO 50001. Esta ha sido utilizada con éxito en investigaciones precedentes (Rey, 2014; Labañino 2015). Luego, se justifica y describe la propuesta y, además, se establecen los impactos económicos, sociales y ambientales de la producción de energía eléctrica.

Finalmente, se exponen las conclusiones generales (que recogen los principales resultados de la investigación), las recomendaciones (que constituyen punto de partida para futuros trabajos) y los anexos, que complementan adecuadamente la información expuesta en el presente informe de Tesis.

CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO Y CONTEXTUAL PARA LA EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA WÄRTSILÄ W18V32

1.1. Introducción al capítulo

Constituye una tarea compleja y novedosa la evaluación energética de los parámetros fundamentales de funcionamiento de los motogeneradores Wärtsilä W18V32 y la determinación de la incidencia que estos tienen en la operación de los equipos electrógenos explotados por la empresa Petroamazonas EP, para la generación eléctrica en el campo Edén Yuturi del Bloque 12. Esta temática no ha sido suficientemente investigada para el caso del sector petrolero ecuatoriano. Es por ello, que se requiere del estudio de los aspectos teóricos y los trabajos previos que pueden contribuir en el análisis y la solución del problema investigado.

El objetivo del presente capítulo es: desarrollar un marco teórico y contextual útil para la evaluación energética de los equipos electrógenos Wärtsilä W18V32, a partir de la sistematización del conocimiento científico precedente.

1.2. Marco legal referente a la generación eléctrica y la producción de hidrocarburos

En este epígrafe, para no disociar el contenido técnico del capítulo, solo se hace una breve referencia a la fundamentación legal existente en el Ecuador y a las normas de la empresa Petroamazonas EP.

El 16 de enero de 2015, en el Tercer Suplemento del Registro Oficial No. 418, se publicó la Ley Orgánica del Servicio Público de Energía Eléctrica (LOSPEE), que estableció un nuevo marco legal, acorde a los preceptos constitucionales, sustituyendo a la anterior Ley de Régimen del Sector Eléctrico (LRSE) de 1996 (Registro Oficial No. 418: Tercer Suplemento, 2015).

La electricidad es utilizada en la mayoría de actividades del ser humano y la tendencia de consumo va en aumento, es por eso que su generación es la parte fundamental del desarrollo Tecnológico (Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos, 2016). Según datos del Balance Energético Nacional del Ecuador del año base 2014 (Figura 1.1), en el

país la principal fuente de energía primaria con una participación del 89 % es el petróleo, 5 % gas natural, 4 % hidroenergía, 1 % leña y 2 % de productos de caña (Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos, 2015).

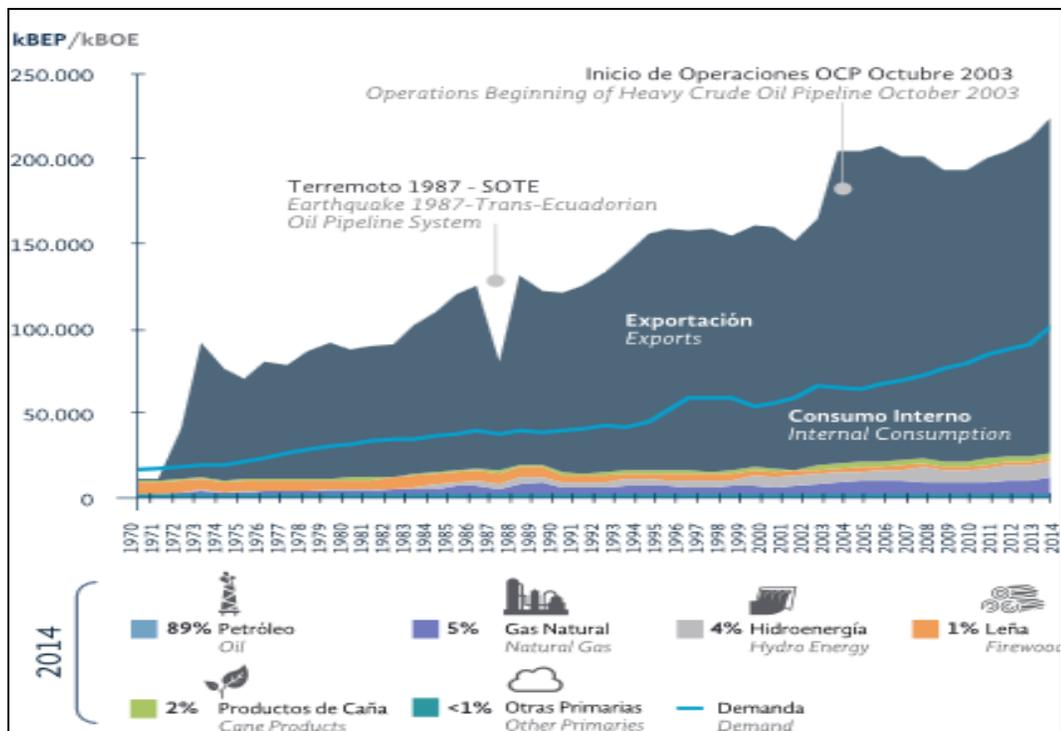


Figura 1.1. Evolución de la Oferta de Energía en Ecuador (periodo 1970 -2014).

Fuente: Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos, 2015.

En el Ecuador el 27 % de la potencia instalada nacional de electricidad pertenece a la generación térmica con MCI (Figura 1.2), esta ha ido creciendo desde el año 2000 hasta el punto de que representa la segunda en aporte de potencia instalada después de la energía hidráulica (Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos, 2015).

La LOSPEE contiene consideraciones para disminuir la utilización de combustibles fósiles, generación eficiente de electricidad y eficiencia energética.

La autogeneración petrolera podría eventualmente producir excedentes, pero al no estar incorporados al Sistema Nacional Interconectado (SNI) no se aprovecha los mismos y se opera las plantas de generación eléctrica de manera de abastecer su demanda. Para resolver esta dificultad Petroamazonas EP y su proyecto para la operación eficiente de generación eléctrica con el nombre de Optimización de Generación Eléctrica y Eficiencia

Energética contempla entre sus objetivos, realizar la interconexión eléctrica de las operaciones petroleras y utilizar el gas para disminuir el consumo de diésel en la operación petrolera, el uso del gas asociado va ligado directamente al rediseño de los MCI y una operación eficiente de las plantas de generación para lograrlo.

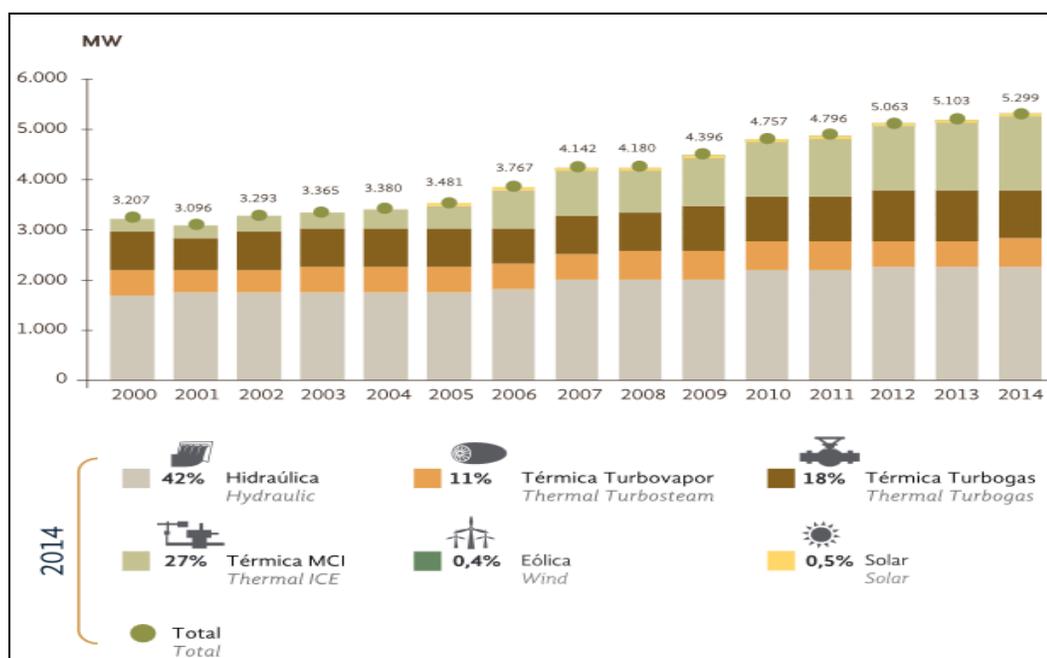


Figura 1.2. Potencia efectiva instalada en Ecuador (periodo 1970 -2014).

Fuente: Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos, 2015.

Los requisitos legales que se deben cumplir, basados en el compromiso definido en la política ambiental, son principalmente los del RAOH 1215 (Reglamento Ambiental para las Operaciones Hidrocarburíferas, controlado por DINAPA), RAAE 1761 (Reglamento Ambiental para Actividades Eléctricas en el Ecuador, controlado por el CONELEC), que principalmente están relacionados con:

- Manejo de desechos sólidos.
- Monitoreo del aire.
- Monitoreo de los gases de la combustión.
- Monitoreo de agua.
- Monitoreo de ruido ambiental.

- Monitoreo de suelos contaminados y su remediación.
- Procedimiento de seguridad industrial
- Relaciones con la comunidad.

1.2.1. Regulaciones establecidas por el CONELEC

1.2.1.1. Regulación No. CONELEC - 006/09:

El artículo 413 de la Constitución de la República del Ecuador, establece que el Estado promoverá la eficiencia energética, el desarrollo y uso de prácticas y tecnologías ambientalmente limpias y sanas. Por su parte, el artículo 414 de la Carta Fundamental dispone que el Estado adopte medidas adecuadas y transversales para la mitigación del cambio climático, mediante la limitación de las emisiones de gases de efecto invernadero, la deforestación y la contaminación atmosférica; además, tomará medidas para la conservación de los bosques y la vegetación, y protegerá a la población en riesgo (Constitución de la República del Ecuador, 2015)

1.2.1.2. Regulación No. CONELEC - 006/10:

El artículo 14, inciso segundo de la Constitución de la República del Ecuador, declara de interés público la preservación del ambiente, la conservación de los ecosistemas, la biodiversidad y la integridad del patrimonio genético del país, la prevención del daño ambiental y la recuperación de los espacios naturales.

El artículo 3 de la Ley de Régimen del Sector Eléctrico establece que en todos los casos los generadores, transmisor y distribuidores observarán las disposiciones legales relativas a la protección del medioambiente y que, previo a la ejecución de la obra, los proyectos de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica deberán cumplir las normas existentes en el país relativas a la preservación del medioambiente;

El artículo 41 del Reglamento Ambiental para Actividades Eléctricas establece que los proyectos de generación, transmisión o distribución eléctricas ubicados total o parcialmente dentro de las zonas de Patrimonio Nacional de Áreas Naturales Protegidas, del Patrimonio Forestal del Estado o de bosques y vegetación protectores, deberán

obtener, previo a la presentación del estudio de impacto ambiental preliminar ante el CONELEC, la autorización del Ministerio del Ambiente.

El artículo 42 del Reglamento Ambiental para Actividades Eléctricas establece que para la realización de proyectos, obras o instalaciones eléctricas en las zonas del Patrimonio Nacional de Áreas Naturales Protegidas, del Patrimonio Forestal del Estado o de los Bosques y Vegetación Protectores, se deberá declarar los mismos como obra pública prioritaria para el sector eléctrico, por parte del Directorio del CONELEC, a pedido de su Director Ejecutivo;

Los interesados en desarrollar proyectos de generación ubicados total o parcialmente dentro de áreas protegidas, deberán observar lo dispuesto en el Reglamento de Concesiones, Permisos y Licencias para la Prestación del Servicio de Energía Eléctrica, el Reglamento Ambiental para Actividades Eléctricas y normativa relacionada, para lo cual deberán considerar lo siguiente:

- a. Ser un proyecto con una potencia mayor o igual a 50 MW.
- b. Preferentemente debe ser un proyecto contemplado dentro del Plan Maestro de Electrificación, aprobado por el CONELEC.
- c. Presentar el Estudio de Impacto Ambiental Preliminar del Proyecto, o el definitivo, en el caso de que se lo disponga.
- d. Presentar el Estudio de Prefactibilidad del Proyecto, en el cual se incluyan estudios eléctricos, energéticos y económicos que demuestren técnica y económicamente los beneficios para el sistema eléctrico ecuatoriano, de contar con la generación proveniente del proyecto que se está analizando.
- e. Que el proyecto propuesto tenga una eficiencia energética acorde con las tecnologías de punta disponibles en el mercado, de tal manera que los costos de producción estimados, para dicho proyecto, sean menores al promedio de generadores del mismo tipo (hidroeléctrico, vapor, combustión interna, eólico, biomasa, fotovoltaico) en el sistema eléctrico ecuatoriano o en el ámbito internacional, si se trata de una nueva tecnología.

Para estos casos, se debe considerar al proyecto en su conjunto, es decir, la central de generación y las obras complementarias requeridas para su unión a los sistemas de transmisión o de distribución.

1.2.1.3. Regulación No. CONELEC – 001/12

El artículo 313, de la Constitución de la República del Ecuador, establece que el Estado se reserva el derecho de administrar, regular, controlar y gestionar los sectores estratégicos; dentro de los cuales, se considera a la energía en todas sus formas;

El artículo 30 de la Ley de Régimen del Sector Eléctrico establece que la construcción y operación de centrales de generación de 50 MW o menos, sea que se destinen a la autogeneración o al servicio público, requerirán de un permiso concedido por el CONELEC;

El artículo 73 del Reglamento General a la Ley de Régimen del Sector Eléctrico establece que los sistemas eléctricos no incorporados deberán operar mediante concesiones o permisos otorgados por el CONELEC;

1.2.2. Consideraciones especiales para los autogeneradores en sistemas aislados

Por las particularidades que presentan los autogeneradores petroleros o mineros en sistemas aislados, ya que se trata de una actividad delegada por el Estado a través del respectivo contrato, se ha determinado que se le permitirán las siguientes consideraciones especiales:

- Disponer de su generación total para su consumo propio, pudiendo tener disponibilidad adicional de energía (reserva).
- Operar independientemente sus instalaciones de generación, de acuerdo a sus necesidades de demanda -consumo propio-.
- Tener libertad para movilizar y/o reubicar los equipos de generación de su área de concesión petrolera o minera.
- La reversión y afectación de los bienes en el ámbito eléctrico, estará sujeta a las disposiciones constantes en el contrato suscrito para el ámbito petrolero o minero.

- Para el caso de los temas ambientales, esté o no ubicado en una zona protegida, la Licencia Ambiental será aquella otorgada para permitirle explorar, explotar y producir en su área de concesión petrolera o minera. El CONELEC procederá a efectuar una revisión y análisis de los estudios presentados en su momento para la obtención de la licencia ambiental, y verificará que las actividades eléctricas estén incluidas en dicha licencia. En caso de no estarlo, el CONELEC gestionará ante el Ministerio del Ambiente dicha inclusión.
- Estará sujeto a las disposiciones y normas ambientales constantes en la normativa y su respectivo contrato de concesión petrolera o minera, en el caso de retiro de equipos de generación.

Como es lógico, existen otras disposiciones legales y normas complementarias que regulan esta temática, pero no serán abordadas en este trabajo, por las razones explicadas al inicio del epígrafe. En lo adelante, se expondrán los aspectos científico-técnicos relacionados con la investigación.

1.3. Resumen del estado del arte sobre los motores de combustión interna

De acuerdo con Ruiz (2013), desde el siglo XVII comenzaron las alternativas para la construcción de motores de combustión. El primer intento se realizó tratando de obtener trabajo útil de la inflamación de la pólvora dentro de un cilindro con un pistón.

En 1857, los italianos Barsanti y Matteucci construyeron un motor que funcionaba gracias a la inflamación del gas de alumbrado, producto de una chispa eléctrica. Debido a una serie de desventajas que presentaba no encontró aplicación.

No es hasta finales del siglo XVIII que se consigue, a partir de una máquina, trabajo mecánico en escala considerable. En la realidad era un motor de combustión externa, trabajaba mediante el vapor producido por la combustión del carbón; pero aceleró las investigaciones en busca de un MCI.

En 1860 el mecánico francés, Lenoir, construyó un motor de gas (máquina de fuego), la cual funcionaba con gas de alumbrado sin compresión, produciendo una potencia de hasta 12 caballos de fuerza, con un rendimiento efectivo entre 4 y 5 %.

Es Beau de Rochas quien en 1862 por primera vez propuso un motor con compresión de la mezcla. La construcción racional del mismo fue realizada por Otto y Langen en 1867, consiguiéndose con este un progreso importante al ciclo de trabajo. En él se realizaba el ciclo de trabajo en cuatro tiempos, lográndose rendimientos efectivos de hasta 10-12 %.

Al adoptar la compresión de la mezcla, quedaba ya perfilado, en lo fundamental, el ciclo de trabajo sobre el que se ha realizado todo el programa posterior en la construcción de los motores.

Con la construcción del motor Diésel en 1899 se logra una reducción en el consumo de combustible, llegándose a obtener un rendimiento efectivo de hasta un 40 %. Posteriormente, en países desarrollados como: Inglaterra, Francia, la antigua URSS, Alemania y Estados Unidos; se sucedieron a ritmos violentos toda una serie de mejoras en los MCI.

El diseño y la fabricación, ayudado en los últimos años por la computación, motorizó grandes cambios, siempre orientados a la obtención de mejores rendimientos. El avance más popularizado en los motores modernos es la inyección electrónica trabajando conjuntamente con dispositivos como la sonda Lambda y los catalizadores.

Se lograron aumentos de rendimientos volumétricos y mecánicos con la introducción del Turbo con intercooler y sistemas de inyección indirecta. Más recientemente aparecen, las tapas de cilindros multiválvulas y los nuevos aceites lubricantes.

La constante investigación sobre el mejoramiento del rendimiento de los motores (carburación y Diésel) fue llevándolos a aumentar la relación de compresión y a bajar el volumen y consumo. Todas estas características variaron en forma considerable, obteniendo mayor potencia por litro de combustible quemado.

Se han desarrollado automóviles eléctricos (en versión “pura” o en versión “híbrida”), dotados de baterías recargables. Numerosas investigaciones se han llevado a cabo y aún continúan en este sentido, logrando avances significativos. Circulan hoy en día diversas flotas de vehículos nacidos de este concepto. No obstante, esta generación del automóvil completamente eléctrico, especialmente apropiada para la lucha contra la polución en el

medio urbano, tiene problemas en cuanto a los límites de su autonomía y las dificultades relacionadas con las operaciones de recarga. Por lo tanto, se da una mayor preferencia a los vehículos híbridos, que son interesantes en muchos aspectos, pero que sólo pueden disminuir (y no suprimir) la dependencia para con los combustibles petroleros.

Con respecto a los acumuladores recargables, la pila de combustible se ha afianzado desde entonces como una alternativa muy atractiva. El hidrógeno, combinado con el oxígeno del aire ambiente, produce una corriente capaz de alimentar el motor de un vehículo. En lugar de los gases de escape de los MCI, el residuo es agua y un poco de calor. La tasa de emisión teórica de CO₂ y de otros contaminantes nocivos para el medio ambiente y la salud es cero. Estas pilas concilian otras dos ventajas apreciables: un alto rendimiento energético y la ausencia de nocividad sonora.

1.4. Trabajos precedentes sobre motores de combustión interna

Una investigación científica en cualquier área del conocimiento debe siempre estar sustentada por una investigación teórica y empírica, de ahí que sea necesario utilizar los métodos que caracterizan a cada una de ellas para desarrollar científicamente las mismas a partir de una clara caracterización del objeto, del planteamiento del problema, los objetivos, la hipótesis y las tareas (Aróstegui, 1978; Guzman, 2001; Torres, 2003; Legrá y Silva, 2011).

En el desarrollo de la investigación se consultaron diferentes trabajos y estudios, la revisión bibliográfica estuvo dirigida en dos líneas fundamentales: una, la información relacionada con el enfoque teórico - metodológico y otra, los trabajos que sobre el tema investigado (diagnóstico energético de motores de combustión interna y la evaluación del proceso de cogeneración) desde el punto de vista científico, técnico y práctico se han efectuado en los últimos años.

Los trabajos precedentes están estrechamente vinculados con la explotación de los motores de combustión interna, ya que estos constituyen el equipo fundamental en las plantas de generación de energía eléctrica a partir de grupos electrógenos.

Reyes y Alcove (1985), realizan el estudio sobre los problemas principales de la teoría, el funcionamiento óptimo de los MCI y su explotación. Los autores definen con

claridad el análisis de los ciclos termodinámicos, el intercambio de gases, los procesos de combustión, expansión y escape. Establecen las metodologías para el balance térmico y la determinación de los parámetros principales que caracterizan a los MCI. Explican las particularidades de los sistemas básicos del MCI y finalmente valoran la economía del motor y el impacto causado por este al medio ambiente.

La construcción y las particularidades del cálculo de los mecanismos y sistemas de un MCI, son el objetivo principal en la obra “Elementos de construcción y cálculo de los MCI” en la que se establece la metodología para el cálculo de los mencionados mecanismos (Choy y Morozov, 1983).

En otro trabajo se realizan descripciones sobre los bancos de prueba y numeran los elementos que los componen, entre los que se puede mencionar: el banco sobre el que se monta el motor y el freno; los sistemas de alimentación de combustible, de gases de escape, lubricación, enfriamiento; y las estructuras complementarias (Reyes, 1983; Reyes *et al.*, 1983). Menciona los equipamientos principales, los parámetros a medir y termina con ejemplos prácticos de una instalación de prueba. La obra sirve como guía en la realización de prácticas de laboratorio para MCI.

Un aporte importante fue dado por Fernández (1998), al efectuar el estudio sobre la influencia de los combustibles en funcionamiento de los MCI. Señala las cuestiones generales sobre el origen del petróleo y su industria extractiva. Se analizan las diferentes características de los carburantes y su influencia en el trabajo de los motores. Refleja los resultados experimentales de un gran número de investigaciones desarrolladas en el Departamento de Transporte Automotor del “Instituto Superior Politécnico José Antonio Echevarría”. En algunos casos los resultados expuestos se definen, sobre la base de los ensayos realizados.

Malhotra (2004), plantea que los sistemas que combinan la producción de calor y potencia (CHP, por sus siglas en inglés) pueden categorizarse ampliamente en dos grupos:

Sistema superior: (“topping cycle”). Donde el combustible primario se utiliza para la producción de electricidad y la energía termal agotada se utiliza para la calefacción del

proceso. El sistema de cogeneración superior es ampliamente usado y es el método más popular de cogeneración.

Sistema inferior: (“bottoming cycles”). El combustible primario se utiliza para producir energía térmica a temperatura alta. El vapor de descarga caliente es posteriormente utilizado para producir energía eléctrica a través de la pérdida de la caldera de recalentamiento y sistema de generador de turbina. Los ciclos de capa de fundación son adecuados para los procesos de fabricación que requieren calor a temperatura alta en hornos.

Los lubricantes juegan un papel fundamental en el proceso de desgaste entre las piezas de los MCI. Coello *et al.* (2005), brinda una breve panorámica acerca de los aceites lubricantes, su obtención y principales características, así como las especificaciones de la calidad y viscosidad necesarias para ser empleadas en los MCI mediante el análisis del contenido de metales de desgaste en los aceites lubricantes usados. Teniendo en cuenta la evolución que ha tenido el diagnóstico técnico de motores Diésel, se aborda el análisis de laboratorio del aceite, así mismo determinan las causas por las que el aceite se agota y debe salir de servicio. Luego establece la valoración económica y evalúa las afectaciones provocadas por los MCI y los aceites lubricantes al medio ambiente. Al respecto plantea: Las discusiones del llamado "efecto invernadero", provocado por las crecientes emisiones a la atmósfera de gases tales como: CO₂, metano, óxido nítrico y los clorofluorocarbonatos, reflejan la necesidad de un enfoque integral en el tratamiento de los problemas ambientales y del desarrollo, así como la necesidad de una acción concertada de la comunidad internacional para mitigar los efectos del calentamiento global.

Tavarez (2007), realiza un cálculo a los parámetros que caracterizan el trabajo del motor de combustión interna 7 de la batería de grupos electrógenos Moa, en este caso los motores diésel de la serie 4000 dedicados a la generación eléctrica. En su trabajo evalúa parámetros como el rendimiento mecánico, térmico y efectivo.

Lozano *et al.* (2007), investigan el ahorro de energía y los aspectos económicos relacionados con el empleo de motores alternativos de combustión interna en plantas de cogeneración para edificios. Se definen criterios técnicos para caracterizar la operación anual de los sistemas simples de cogeneración que atienden demandas variables de calor.

También se analiza el problema de determinar la capacidad de los motores a instalar tomando en consideración diferentes estrategias de operación. La metodología de análisis propuesta se aplica a una planta que satisface la demanda de agua caliente sanitaria y calefacción de un complejo residencial. Los resultados permiten comparar diversas estrategias de operación.

Gómez *et al.* (2008), presenta un nuevo procedimiento; diferente al criterio tradicional de iguales costos incrementales, para efectuar la distribución de carga entre turbogeneradores en un sistema de cogeneración conectado a la red empleando técnicas de inteligencia artificial.

Resulta muy útil la revisión de los trabajos de González (2008), que aborda la temática relacionada con la teoría general de los sistemas de cogeneración, el autor conceptualiza con claridad los métodos sistemáticos de análisis del conocimiento científico, permitiéndole al investigador su empleo para sustentar teóricamente la investigación a pesar de que algunos términos y definiciones han evolucionado en el presente, su esencia se mantiene vigente.

El autor anteriormente citado refiere que la cogeneración es la producción secuencial de energía eléctrica o mecánica y de energía térmica útil, a partir de la misma fuente primaria. Cuando la energía para producir la electricidad o el trabajo mecánico se extrae de una corriente de energía térmica anterior a un proceso, el esquema se conoce como Sistema Superior (“top ping cycles”). Inversamente, cuando la electricidad o la energía mecánica se extraen de la corriente térmica proveniente de un proceso, el esquema se conoce como Sistema Inferior (“bottoming cycles”).

El propósito es optimizar la distribución de carga teniendo en consideración la demanda térmica del proceso, las condiciones técnicas de los equipos y producir la máxima energía eléctrica aún en condiciones variables de los parámetros del vapor como es frecuente en situaciones reales. Para lograr este objetivo, las características de los turbogeneradores son modeladas mediante redes neuronales artificiales mientras que la optimización se lleva a cabo con un algoritmo genético.

Para demostrar la validez del método, se presenta como caso de estudio los resultados alcanzados en la empresa azucarera Ciudad Caracas de la provincia de Cienfuegos, Cuba.

Si se comparan los resultados obtenidos por el sistema inteligente propuesto con las prácticas actuales de operación, se observará mayor potencia generada, mayor producción de energía y en consecuencia mayores ingresos. El método puede ser aplicado a otros sistemas de producción combinada de potencia y calor (sistemas de cogeneración).

Velázquez (2008), caracterizó la batería de grupos electrógenos en Moa-Cuba y aplicó la teoría de Taguchi para desarrollar el diseño de experimentos de la investigación. Además, estableció el procedimiento de análisis para la determinación del rango de normalidad del índice de consumo y sus niveles de variación para trabajos con densidades variables y constantes. Finalmente, expuso los impactos económicos y ambientales asociados al trabajo de los MCI. Por su parte, Durán (2009) estableció el procedimiento de análisis para el índice de consumo y la potencia de servicio de la batería de grupo electrógenos bajo condiciones climatológicas locales del sitio donde están emplazados. El autor concluyó que la climatología no tiene influencia significativa en los citados parámetros.

La simulación del sistema de escape de un motor de combustión de cuatro tiempos encendido por chispa se puede realizar a partir de la teoría de flujo inestable de gases utilizando ondas de presión (Mantilla *et al.*, 2009). El método propuesto por el autor para el análisis se basa en la discretización de espacios interpolables denominados mallas, que se ubican a lo largo de toda la tubería sin importar la forma o el tamaño de esta. Se hace entonces una exploración teórica por los aspectos más importantes, como son el movimiento y choque de las ondas de presión y su aplicación a casos encontrados en ductos de motores reales. Asimismo, se plantea la forma en que debe realizarse la simulación utilizando como base la anterior exploración. Los modelos matemáticos creados muestran la gran influencia que ejerce el movimiento de las ondas de presión dentro de un motor sobre el flujo a través del mismo y por ende sobre su desempeño final.

Roque y Roque (2010), plantea un modelo basado en la teoría general de costo del exergético. Con este modelo analiza un caso hipotético de la cogeneración simple. El sistema opera con dos máquinas de calor, con un recuperador de calor y un sistema de refrigeración. Además, plantea que se requieren la caracterización de las cargas

demandadas de potencia, calentamiento, refrigeración y su variación de tiempo durante años, estaciones, meses e incluso horas o minutos.

Ruiz (2013), estableció el procedimiento de análisis para la determinación de los diferentes criterios de eficiencia de cogeneración, concluyendo que el más importante de estos es el rendimiento global de cogeneración cuyos valores oscilaron alrededor del 90 % para los cuatro MCI de la batería de grupos electrógenos fuel oil de la empresa Termoeléctrica de Felton-Cuba. En la investigación además se calcula el potencial de cogeneración para las cargas evaluadas (75, 80, 90 y 100 %).

En la empresa antes mencionada también se realizó el cálculo térmico verificativo de los parámetros de funcionamiento de un motogenerador marca Hyundai 9H25/33 del grupo electrógeno y se demostró que la mayor utilización de calor se corresponde con el equivalente al trabajo efectivo con el 42 % y las pérdidas debidas a los gases de escape representan el 39 % (Vega, 2013).

1.4.1. Transferencia de calor en motores de combustión interna

El estudio de los fenómenos de la transmisión de calor y balance térmico en los motores de combustión interna alternativos ha sido objeto de investigación de varios autores (Buttsworth, 2002; Tatschl *et al.*, 2006; Kavtaradze *et al.*, 2007). En esta temática se destacan los siguientes trabajos.

Borman y Nishiwaki (1987), publicaron una vasta revisión del estado de la transferencia de calor en los motores de combustión interna. Finol y Robinson (2006) presentaron también una revisión, pero ésta se limitó a enumerar las principales correlaciones encontradas en la literatura del coeficiente global de transferencia de calor en el cilindro del motor. Las conclusiones del trabajo de Borman y Nishiwaki (1987) no han variado mucho y lo que ha venido marcando la diferencia es el incremento de trabajos basados en los métodos computacionales. Se ha trabajado más sobre los modelos detallados del coeficiente de película local, el procesado de mediciones de temperaturas instantáneas de pared y el refinamiento de algoritmos matemáticos para el procesamiento de esta información.

Aunque desde la segunda década del siglo pasado, cuando se iniciaron los primeros trabajos de modelado de la transferencia de calor, ha habido grandes avances en los análisis teóricos y experimentales, aún no se ha desarrollado un modelo predictivo satisfactorio de cálculo del calor transferido entre las paredes de la cámara de combustión y los gases. Así lo confirma también la revisión realizada por Finol y Robinson (2006).

Al respecto uno de los trabajos más completos sobre esta temática es el realizado por Romero (2009), cuyo principal objetivo fue la utilización y extensión de un programa computacional de predicción de temperaturas de paredes del motor y de dos programas comerciales de modelado de sistemas termohidráulicos para estudiar los flujos de calor dentro y fuera de la estructura del motor, para evaluar el balance térmico de los motores en estado estacionario y en condiciones transitorias, y para modelar, simular y validar diseños nuevos de sistemas de refrigeración de motores para locomotoras. También este autor realiza una extensa revisión y establece un estado del arte sobre la temática donde analiza como temas fundamentales: transferencia de calor dentro del cilindro y en otros sistemas del motor; gestión térmica de los motores de combustión; además sistematiza los estudios analíticos, experimentales y numéricos precedentes.

1.4.2. Trabajos precedentes realizados en Ecuador

A nivel nacional, se encontraron varias publicaciones relacionadas con la temática estudiada. A continuación, se analizan los trabajos más pertinentes.

Buñay y Pérez (2012), analizaron y compararon los costos de producción de energía eléctrica para diferentes tecnologías empleadas en Ecuador, para tener una referencia local de los costos para inversiones en proyectos futuros. Se describen brevemente las tendencias mundiales y locales de fuentes de energía primaria empleadas para la producción de electricidad, la evolución y proyección de la demanda de energía eléctrica a nivel mundial y nacional. Además, explican la situación presente de la Matriz Eléctrica del Ecuador y su perspectiva futura.

Barahona (2013), desarrolló, construyó y probó un sistema de uso de Biogás como combustible en un Motogenerador Eléctrico, con la finalidad de utilizar este combustible que se produce en el biodigestor de la hacienda Agrogana, ubicada en la ciudad de Latacunga. Se pretende además reemplazar la gasolina con biogás, con aplicación a

generar electricidad. Se presenta un análisis experimental y teórico de la operación en motores de combustión interna.

Borja y Navas (2013), realizaron la adaptación de un motor eléctrico en una motocicleta propulsada por un motor de combustión interna, para analizar la eficiencia energética y autonomía en un prototipo de motocicleta eléctrica. Se realizó la comparación, fundamentada con datos, en la que se determinó si los vehículos eléctricos presentan una mejora en eficiencia y autonomía energética en relación a los motores movilizadas por combustibles fósiles.

Durán (2013), analiza las normativas para la aplicación de la Generación Distribuida y emite recomendaciones sobre los estudios que deben realizarse para calificar y evaluar los proyectos de Generación Distribuida que, según las tecnologías y potencias, encuentren espacio en el sistema eléctrico en función de la ubicación en la etapa funcional de subtransmisión o distribución.

Córdova (2014), realizó su investigación en una planta de generación que posee 7 motores de combustión interna marca Wärtsilä los cuales generan en total 42 MW y utilizan crudo pesado como combustible. La planta de generación aporta aproximadamente el 42 % del total de energía requerida para la operación del bloque petrolero. Analizó los principales problemas de mantenimiento que presentaron los motores y, a partir de las recomendaciones realizadas, consiguió prolongar el periodo de los mantenimientos mayores de los motores de 8000 a 12000 horas; reducir el número de fallas producidas por los sistemas de combustible y lubricación; y disminuir el costo de mantenimiento de los motores.

Banda (2015), simuló sistemas recuperadores de calor a partir de los gases de combustión de motogeneradores a crudo, empleando el simulador Hysys 7.2. Inicialmente se validaron los criterios de simulación en base a las condiciones de operación actuales del sistema de recuperación de calor de la estación EPF, operada por Petroamazonas EP. Luego analizó diferentes alternativas para el uso de los gases de escape (cogeneración y recuperación de calor para calentamiento de petróleo), determinando que para pequeñas capacidades de generación instaladas es recomendable

la recuperación de calor para el calentamiento de petróleo crudo. En el estudio se analizaron diferentes fluidos térmicos receptores del calor residual (aceite térmico, vapor de agua y agua líquida).

Miño (2015), analizó y perfeccionó los indicadores de Gestión del Mantenimiento de una Planta de Generación, mediante el análisis de Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad de un motor de combustión interna Wäertsilä W18V32 LNGD. Luego, determinó los equipos en que se deben tomar acciones correctivas, demostró el deficiente estado en el que se encuentra la Gestión del Mantenimiento del equipo y Planta; y concluyó como equipo crítico al motor de combustión interna.

Reyes (2015), dota a la carrera de Ingeniería en Electromecánica de la Universidad Técnica de Cotopaxi Extensión la Maná, de un laboratorio de motores de combustión interna para vehículos, en el cual se puede constatar el funcionamiento del motor y los sistemas que lo integran, realizar ensayos e investigaciones, para ello desarrolla guías de laboratorio para las prácticas.

Túqueres (2015), analiza el funcionamiento de los motores de combustión interna y las turbinas a gas que consumen combustible fósil para la generación eléctrica en las centrales termoeléctricas. Estudió la obtención de biodiesel de origen vegetal, obtenido por un proceso de transesterificación del aceite de palma africana y se investiga su posible compatibilidad físico-química con el diésel convencional derivado de petróleo, con el fin de determinar la posibilidad de reemplazarlo. Para ello investiga la pre factibilidad financiera del proyecto de sustitución de diésel por biodiesel.

Murillo (2016), desarrolló el análisis de eficiencia y desempeño del motor de combustión interna del Chevrolet Sail 1.4L modelo 2012, para ello emplearon el dinamómetro que les permitió realizar un análisis de curvas de torque y potencia utilizando gas hidrogeno como combustible.

1.5. Generalidades de la generación eléctrica en plantas diésel

Durante la década del 50 del siglo pasado, los motores de combustión interna basados en ciclo diésel fueron sustituyendo a las turbinas de vapor en propulsión naval. Principalmente, se utilizaban motores de dos tiempos que, al trabajar con una velocidad

más baja, se podían acoplar directamente al propulsor. La evolución posterior se concentró en la mejora de los motores de cuatro tiempos, más rápidos, con menor peso y volumen. Al ser más rápidos, necesitaban el acoplamiento de un reductor intermedio al propulsor. A pesar del aumento del número de componentes, el peso total y el volumen se reducía, lo que proporcionaba una mejor utilización del volumen de carga del buque. El combustible que se utilizaba era casi únicamente producto destilado, relativamente económico en aquellos años. La velocidad a alcanzar por el buque y la disponibilidad de espacio primaban sobre la economía del combustible (Gutiérrez, 2000).

Según la literatura antes referenciada, esos tipos de MCI se empleaban para la generación de energía eléctrica en plantas estacionarias. La utilización de motores diésel para la generación de energía eléctrica se generalizó en plantas estacionarias de tamaño mediano. Comenzaron también los problemas en estas plantas, atribuibles a la calidad del combustible. Para los usuarios, se trataba de problemas de diseño de las máquinas, no evolucionadas para utilizar el nuevo tipo de combustible que se popularizaba por su bajo precio. Sin embargo, para los fabricantes se trataba de un problema de mantenimiento, especialmente en lo referido a la inclusión de los nuevos componentes: centrífugas, filtros, requeridos para el tratamiento de este nuevo tipo de combustibles de peor calidad, y a los que el usuario no estaba acostumbrado.

Desde estas bases se evoluciona a la situación actual en donde los fabricantes ya se han adaptado a la utilización de fuel pesado como combustible principal, ofreciendo máquinas y equipos auxiliares de tratamiento para la combustión de productos con densidades de 990 kg/m^3 a 15°C y viscosidades de hasta 700 cSt a 50°C .

La oferta se diversifica y se especializa, y además de las soluciones para la generación en carga base con un combustible económico, se desarrollan soluciones particulares para la utilización de crudo y gas como combustible, manteniendo el alto rendimiento de las máquinas de ciclo diésel.

La utilización de gasoil destilado como combustible, queda para las instalaciones de pequeña potencia, donde prima su facilidad de instalación y manejo, frente a la economía de operación. Se desarrollan también las máquinas duales, capaces de quemar tanto gas como destilado/fuel pesado, para aquellas instalaciones de grupos de emergencia donde

debe de primar la seguridad de funcionamiento, y la conmutación inmediata entre distintos combustibles añade un mayor margen de seguridad frente a posibles fallos en el suministro.

Otro aspecto interesante en relación con las plantas diésel, según los criterios del autor, es que los motores de combustión interna, frente a otro tipo de accionamiento primario, ofrecen la ventaja de su mejor rendimiento. En la Figura 1.3a se comparan los rendimientos de distintas soluciones: motores diésel, turbinas de gas, turbinas de vapor y ciclos combinados.

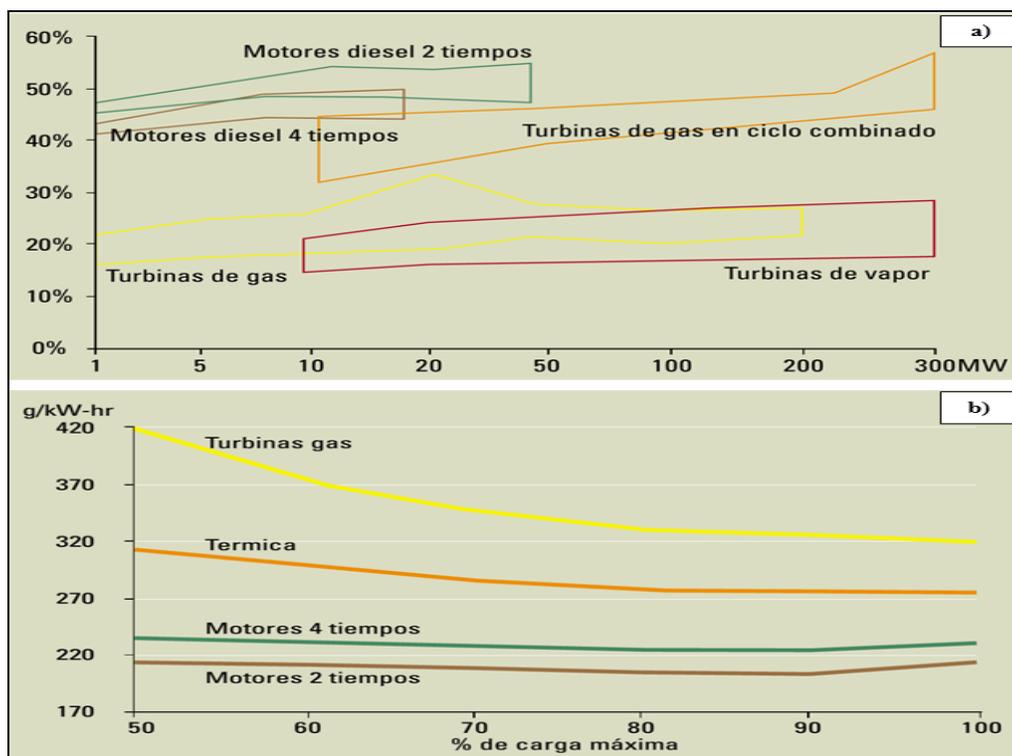


Figura 1.3. Aspectos energéticos de diferentes tecnologías de plantas eléctricas.

a)- Rendimiento térmico vs. Potencia instalada; b)- Consumo de combustible vs. Carga parcial

Fuente: Gutiérrez, 2000.

Como se aprecia, la tendencia natural en grandes instalaciones de generación es hacia las instalaciones de turbinas de gas en ciclo combinado, donde se aprovecha el calor de los gases de escape para producir vapor, que se utiliza a su vez para generar energía eléctrica en una turbina, obteniendo un rendimiento muy elevado en la instalación. Sin

embargo, esta no es la situación que se da en los países en vías de desarrollo, ni en zonas aisladas. En estas circunstancias, la solución más eficaz suele ser la del establecimiento de plantas de generación de potencia mediana, próximas a los lugares donde se produce el mayor consumo.

Cuando se producen grandes oscilaciones en la demanda y esta última tiene que ser atendida por una única central eléctrica, aquí nuevamente los motores diésel tienen un comportamiento superior. Estos son capaces de mantener un mejor rendimiento trabajando a baja carga, que lo que pueden ofrecer otras tecnologías (Figura 1.3b). Como se aprecia, solo los sistemas a base de Turbinas de gas en ciclo combinada se acercan a los rendimientos obtenidos con los motores de combustión interna.

1.6. Particularidades de las centrales eléctricas fabricadas por la empresa Wärtsilä

La compañía Wärtsilä fabrica “soluciones modulares”¹ que luego replican por todo el mundo, pero siempre adaptadas a las exigencias de los clientes, un ejemplo de ella se ilustra en la Figura 1.4 (Soluciones para Centrales Eléctricas, 2014). En el marco de la creciente demanda energética, la modularidad de las soluciones de Wärtsilä hace muy sencillo expandir una planta para cubrir las necesidades futuras.

Las centrales de Wärtsilä posibilitan la transición hacia un sistema energético moderno y sostenible. Las claves son su altísima eficiencia energética, su flexibilidad operacional sin igual y su capacidad de operación multicomcombustible. Son capaces de equilibrar las grandes fluctuaciones de potencia de entrada solar y eólica presentes en los sistemas energéticos bajos en carbono de hoy en día. También proporcionan generación energética de base, compensación de picos de demanda y seguimiento de carga con alta eficiencia, así como reservas de red ultrarrápidas para el sistema energético nacional.

La tecnología de generación energética de Wärtsilä ha sido desarrollada para proporcionar una combinación única de valiosas características que abre nuevos horizontes para los sistemas energéticos del futuro. Las aplicaciones pueden variar desde

¹**Soluciones modulares:** un módulo es un componente autocontenido de un sistema que cuenta con una interfaz bien definida hacia el resto de componentes. Por tanto, un sistema es modular si incluye o utiliza módulos, que pueden ser intercambiados entre ellos sin ser desmontados.

plantas de generación de base tanto estacionarias como flotantes, hasta servicios de estabilidad dinámica de red y compensación de picos; así como autogeneración industrial.

Las interfaces comunes y la flexibilidad del diseño modular de Wärtsilä, cumpliendo todas las especificaciones y recomendaciones, proporciona una solución tanto para la demanda actual como para las necesidades potenciales del día de mañana. El eje de la modularización son los motores y el edificio que los alberga, pero el uso de módulos se extiende a toda la planta, incluyendo la descarga de combustible, aceite lubricante y otros componentes del proceso. Usando soluciones modulares (Figura 1.5), la compañía Wärtsilä puede asegurar que se alcanzan los objetivos de rendimiento.

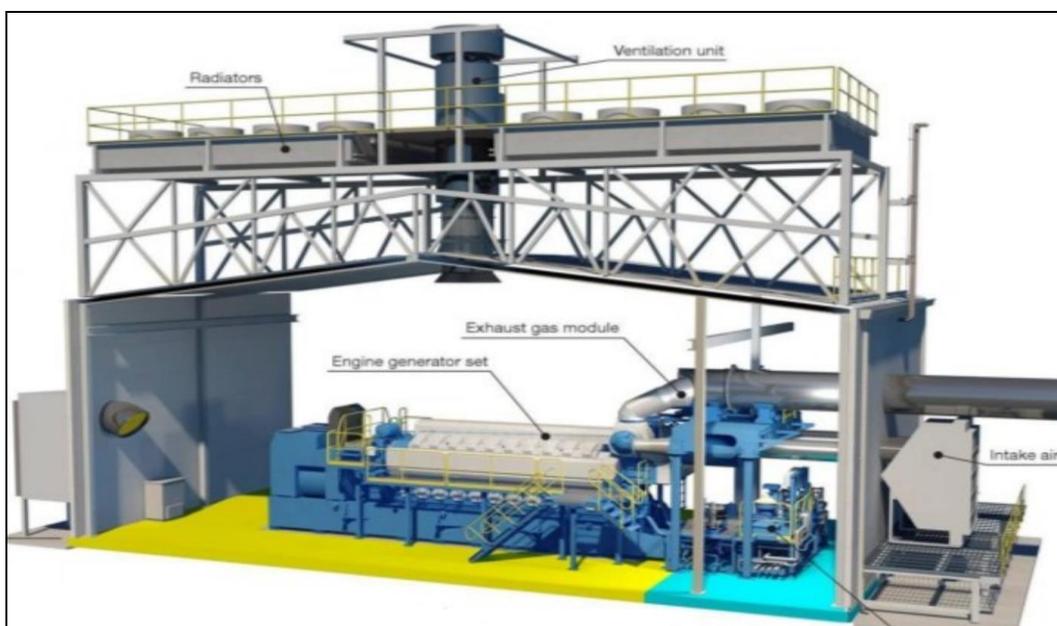


Figura 1.4. Soluciones modulares de centrales eléctricas Wärtsilä.

Fuente: Soluciones para Centrales Eléctricas, 2014.

Las interfaces comunes y la flexibilidad del diseño modular de Wärtsilä, cumpliendo todas las especificaciones y recomendaciones, proporciona una solución tanto para la demanda actual como para las necesidades potenciales del día de mañana. El eje de la modularización son los motores y el edificio que los alberga, pero el uso de módulos se extiende a toda la planta, incluyendo la descarga de combustible, aceite lubricante y otros componentes del proceso. Usando soluciones modulares (Figura 1.5), la compañía Wärtsilä puede asegurar que se alcanzan los objetivos de rendimiento.

La instalación en tiempo récord es uno de los principales beneficios. La prefabricación también asegura niveles de calidad elevados y consistentes. Otras bondades incluyen el diseño compacto y predefinido para transporte en contenedores, y el uso de componentes probados de proveedores reconocidos. El uso de módulos estandarizados implica una mayor calidad de documentación durante la fase de proyecto. En comparación con la realización del trabajo en el emplazamiento final, los procesos de manufactura, limpieza y pintura asociados con la modularización, tienen un impacto medioambiental positivo. Para el cliente, el diseño modular significa un mayor retorno de su inversión.

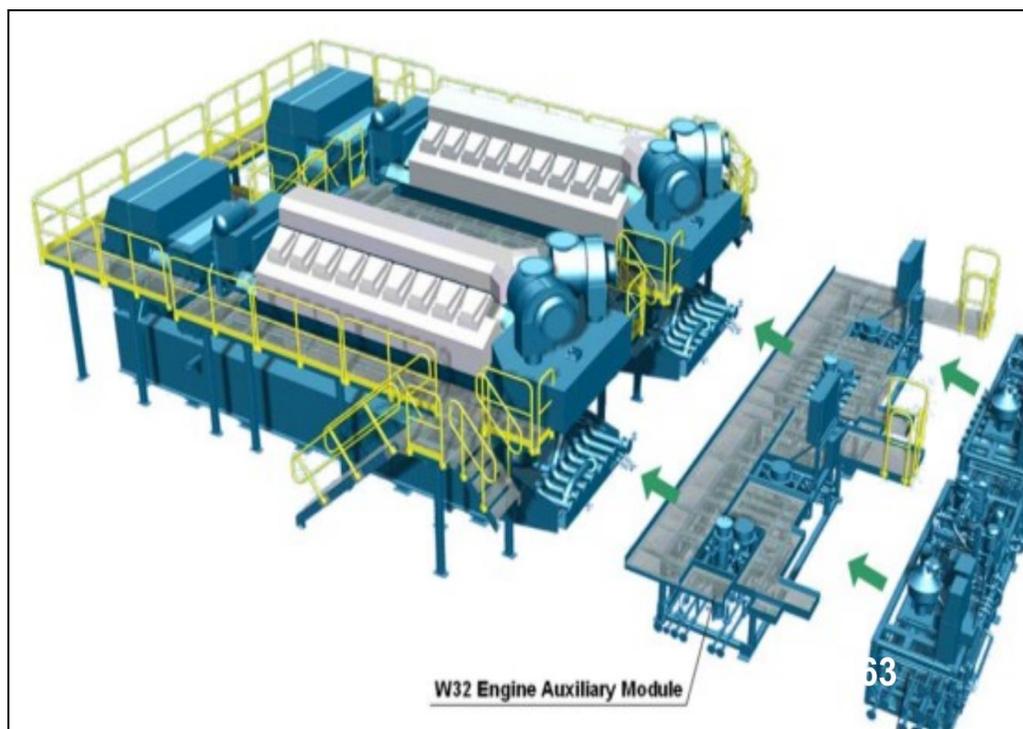


Figura 1.5. Módulos auxiliares en las centrales eléctricas Wartsilä.

Fuente: Soluciones para Centrales Eléctricas, 2014.

Según la bibliografía consultada (Soluciones para Centrales Eléctricas, 2014) la modularización genera los siguientes beneficios:

- Una solución prediseñada que puede ser personalizada para cubrir necesidades específicas.
- Instalación fácil y rápida.

- Diseño probado.
- Control de calidad fiable y exhaustivo.
- Optimización del sistema de tuberías.
- Montaje compacto.
- Interfaces de conexión estándar.
- Dimensiones de transporte optimizadas.

1.6.1. Sistema eléctrico y automático en la central eléctrica Wärtsilä

El concepto de la compañía Wärtsilä del sistema eléctrico y de automatización proporciona una solución completa de gestión de la planta con módulos estandarizados, generadores, aparamenta eléctrica y transformadores, que pueden ser adaptados a las necesidades del cliente. La automatización de las centrales eléctricas Wärtsilä se basa en los siguientes módulos.

- ✓ *WOIS (Wärtsilä Operators Interface System)* es la consola del operador, para visualización del proceso, acciones de control, tendencias, alarmas y eventos.
- ✓ *WISE (Wärtsilä Information System Environment)* es la consola para informes, registro, documentación electrónica e interfaces de terceros.
- ✓ UNIC es el sistema integrado de gestión del motor, que maneja todas las funciones de control, monitorización y protección, junto con el PLC.
- ✓ El sistema de control basado en PLC maneja el control y monitorización del genset y equipamiento de planta.
- ✓ La conexión remota proporciona un vínculo seguro a través de internet o satélite, proporcionando acceso remoto a la información en *WOIS* y *WISE*.
- ✓ El sistema de informes para Mantenimiento basado en condición (CBM) es un sistema de evaluación y reporte creado por los expertos de Wärtsilä.
- ✓ La *Archiving Station* opcional posibilita el almacenamiento perpetuo de datos de la planta.

Todos estos sistemas han sido diseñados para una integración completa, y cuentan con interfaces de usuario claras y sencillas, proporcionando un acceso uniforme y lógico para el operador.

1.6.1.1. Modo de operación automática

La flexibilidad operativa se aplica en el mismo paquete para carga base, intermedia, seguimiento de picos o generación *standby*, los controladores inteligentes de la solución de Wärtsilä proporcionan:

- ✓ Participación isócrona de carga de potencias activa y reactiva para operación en modo isla.
- ✓ Control real de la producción de electricidad (los MW) con soporte integrado para frecuencia y factor de potencia para una gestión de planta y de importación/exportación sencilla.
- ✓ Modo tradicional de control *Droop* como reserva

1.6.2. Conjunto motor-generator Wärtsilä

El corazón de una solución de generación eléctrica es el GENSET (grupo motor-generator). Los conjuntos GENSET Wärtsilä consisten de un motor de cuatro tiempos y velocidad media, conectado a un generador a través de un volante de inercia y un acoplamiento flexible, montado en una base común (Figura 1.6). El GENSET es alineado, ajustado y pre-testado en la fábrica, quedando totalmente listo para su instalación con un mínimo de trabajo en el emplazamiento.

Los grupos pequeños y medianos (basados en los motores 32/32TS/32GD/34DF/34SG) se transportan normalmente como una unidad completa, montados en una base común. Si la logística del proyecto lo requiere, los GENSETS también pueden ser desmontados, entregando el motor montado en la base y el generador separadamente. Si fuera necesario, pueden entregarse las tres piezas individualmente.

Los GENSETS grandes (basados en los motores 46/50/46GD/50DF/50SG) se entregan normalmente listos para su montaje en su ubicación final. Por tanto, se transportan en dos bloques, el motor y el generador montados cada uno en su propia base, esto reduce considerable en el peso de transporte.

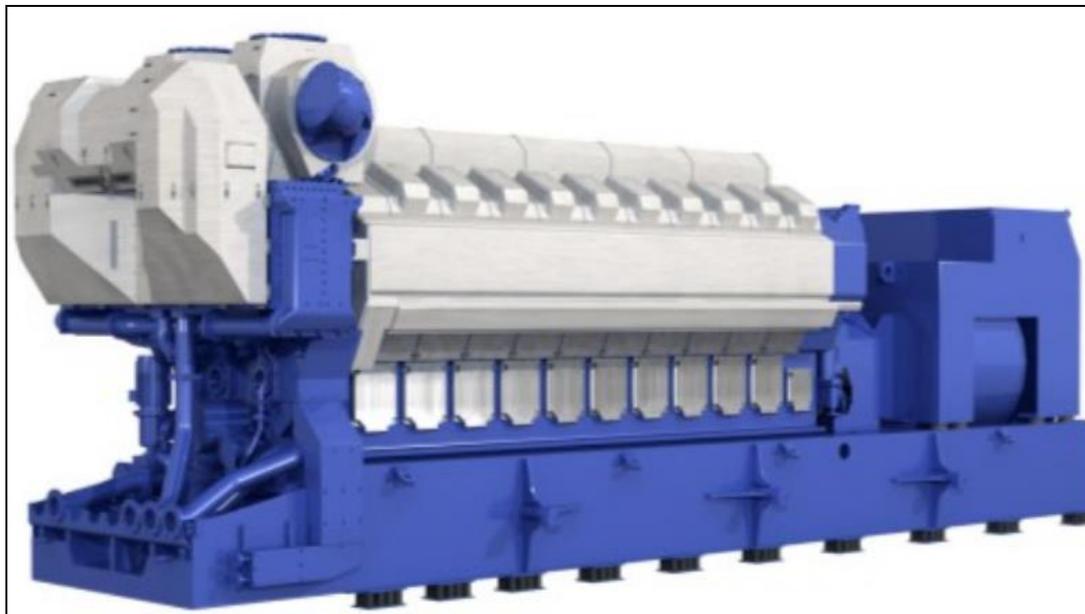


Figura 1.6. Conjunto motor-generador de una central Wärtsilä.

Fuente: Soluciones para Centrales Eléctricas, 2014.

1.7. Eficiencia de los grupos electrógenos

Los grupos electrógenos que utilizan diésel y fuel oil para su funcionamiento están constituidos fundamentalmente por un motor de combustión interna, un generador trifásico y un sistema de control, sin dudas el elemento donde se deben enfocar todos los esfuerzos para minimizar el uso de los portadores energéticos es el motor, ya que el mismo es el encargado de convertir la energía producida durante la combustión en movimiento mecánico, por lo que el conocimiento de los parámetros que determinan la eficiencia de estos equipos es un aspecto fundamental a tener en cuenta para el establecimiento de la estructura de consumo en este tipo de instalaciones.

En la actualidad el consumo de combustible de los motores de combustión interna a partir de derivados del petróleo, tiene una gran importancia teniendo en cuenta el costo de los mismos, así como el progresivo agotamiento de las reservas (González, 2010). Desde otro punto de vista, algunos autores analizan y evalúan los aspectos relacionados con la contaminación atmosférica y la disminución de la capa de ozono, provocada por los desechos de la combustión (Vsórov, 2002).

El consumo de combustible para producir un kWh en los motores de combustión interna, en términos generales, oscila de la siguiente forma: en motores Diésel de 207 a 272 g/kWh y en motores de gasolina de 229 a 353 g/kWh. El consumo de combustible de los motores de combustión interna está determinado por diferentes factores entre los cuales se puede señalar los siguientes: diseño y construcción, explotación, y mantenimiento y reparación (Vega, 2013).

Los factores relacionados con la explotación, mantenimiento y reparación pueden ser medidos y evaluados en correspondencia con los valores o índices dados por el fabricante, determinando las pérdidas de potencia y por ende el exceso de combustible utilizado en los diferentes procesos.

En la actualidad los motores que pudieran denominarse de tercera generación utilizan sistemas electrónicos controlados por una computadora que tiene en cuenta múltiples parámetros de explotación como son: temperaturas del aire o de la mezcla, composición de los gases de salida de la combustión antes y después de los catalizadores de los tubos de escape. Todo ello permite un aprovechamiento mayor de la energía del combustible y, por tanto, un consumo menor.

1.8. Conclusiones del capítulo 1

- ✦ El marco teórico-contextual desarrollado contiene la sistematización del conocimiento científico previo. Además, considera elementos relevantes sobre el marco legal que respalda a la investigación, los trabajos precedentes realizados a motores de combustión interna, la generación eléctrica en plantas diésel, las características de las centrales eléctricas fabricadas por la compañía Wärtsilä y la eficiencia energética. La conjugación de ambos aspectos le confieren utilidad para la evaluación energética del objeto de estudio.
- ✦ La producción de electricidad en Ecuador, utilizando hidrocarburos y sus derivados (crudo, diésel y gas) como fuente de energía y la tecnología de los motores de combustión interna, tiene una incidencia significativa en el sector energético del país. Por tanto, resulta estratégica la evaluación energética sistemática de los motogeneradores que se emplean en las plantas térmicas de

generación de las industrias productoras de petróleo, particularmente en la empresa Petroamazonas EP.

- ✦ Las investigaciones precedentes abordan el balance térmico de motores de combustión interna. Sin embargo, no consideran la evaluación energética de los parámetros fundamentales de funcionamiento de los motores Wärtsilä W18V32 y su incidencia en la operación de los equipos electrógenos explotados por la empresa Petroamazonas EP, para la generación eléctrica en el campo Edén Yuturi del Bloque 12.

CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS USADOS PARA LA EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA WÄRTSILÄ W18V32

2.1. Introducción al capítulo

La evaluación energética de motores de combustión interna instalados en centrales térmicas requiere la medición de un grupo de variables que influyen en su operación. Además, impone la necesidad de determinar sus parámetros fundamentales de funcionamiento. En la literatura especializada se establecen metodologías generales para el diagnóstico térmico de estas instalaciones (Reyes, 1983; Reyes y Alcove, 1983; Reyes *et al.*, 1983). Sin embargo, se requiere la adecuación de los procedimientos de cálculo precedentes a los motogeneradores Wärtsilä W18V32 explotados por la empresa Petroamazonas EP, para la generación eléctrica en el campo Edén Yuturi del Bloque 12.

El **objetivo** del presente capítulo es: exponer los materiales y métodos necesarios para la evaluación energética de los motores de combustión interna Wärtsilä W18V32.

2.2. Localización geográfica del campo Edén Yuturi

El campo petrolero Edén Yuturi, perteneciente al Bloque 12 de Petroamazonas, se encuentra localizado a 75 km en línea recta al Sureste del Campo Shushufíndi y a 30 km al Sur del campo Pañacocha (Fassler, 2016).

La secuencia depositacional correspondiente a la Arenisca M1 es la más joven del sistema sedimentario Hollín-Napo. La mayor particularidad de este ciclo, es de estar restringido a la parte Este de la Cuenca Oriente, siendo su límite depositacional el Corredor Sacha - Shushufíndi.

Las areniscas M1 revelan ambientes fluviales de relleno paleo-valles en la parte central de la cuenca, depositados posiblemente al inicio de un evento transgresivo después de la caída del nivel eustático en el Campaniano (80-75 Ma). Para este ciclo, se interpreta la posición de la línea de costa aproximadamente a lo largo de la frontera oriental entre Ecuador y Perú.

En el mapa geopolítico se observa que el campo Edén Yuturi se encuentra en la provincia de Orellana, cantón Francisco de Orellana, parroquia el Edén (Figura 2.1).

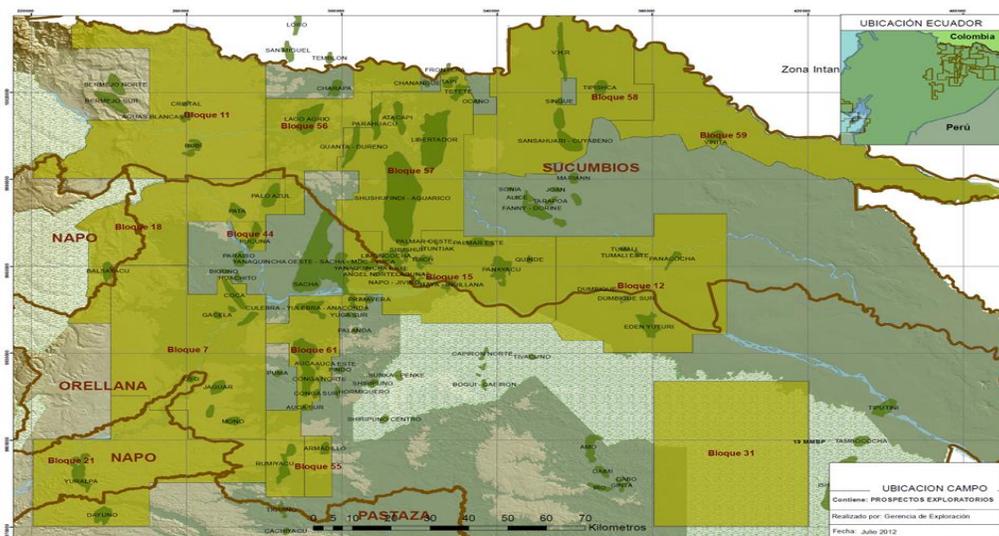


Figura 2.1. Mapa Geopolítico de la región donde está campo Edén Yuturi.

Fuente: Fassler, 2016.

2.3. Particularidades de los motores Wärtsilä W18V32

2.3.1. Diseño general del motor

La información expuesta en este epígrafe se encuentra disponible en la fuente bibliográfica consultada (Manual de instrucción de Motores Wärtsilä W18V32, 2012). Según la misma, el motor es diésel de 4 tiempos, turboalimentado y postenfriado, con inyección directa de combustible. El bloque del motor es de una sola pieza de fundición. El cigüeñal está montado debajo del motor. El sombrerete principal se sujeta con dos tornillos de sombrerete principal tensados hidráulicamente y dos tornillos laterales horizontales.

El receptor del aire de carga y el calefactor de agua de refrigeración están integrados en el bloque del motor. Las cubiertas de la caja del cigüeñal, hechas de metal ligero, se sellan con el bloque del motor por medio de juntas de goma. El cárter de aceite va soldado. Las camisas de cilindro son refrigeradas sólo en la parte superior. El efecto de refrigeración está optimizado para dar la temperatura correcta de la superficie interior. La camisa cuenta con un aro antidesgaste para eliminar el riesgo de pulimento de la camisa.

Los cojinetes principales son cojinetes partidos, trimetálicos o bimetálicos, totalmente intercambiables, que pueden desmontarse retirando la tapa del cojinete. El cigüeñal está

forjado de una sola pieza y se equilibra mediante los contrapesos necesarios. Las bielas tienen un diseño de tres piezas, conocido como de "biela marina". La biela es fundida y mecanizada en una aleación de acero y partida horizontalmente en tres partes para permitir el desmontaje de las piezas del pistón y de la biela. Todos los pernos de la biela están apretados de forma hidráulica para reducir el movimiento relativo entre las superficies de contacto. Los cojinetes de cabeza de biela son partidos, trimetálicos o bimetálicos, totalmente intercambiables.

Los pistones incorporan un sistema de lubricación de falda patentado por Wärtsilä. Las ranuras de segmentos superiores están endurecidas. El aceite refrigerante entra a la zona de refrigeración a través de la biela. Estas zonas están diseñadas para ofrecer un efecto de "coctelera" óptimo.

El juego de segmentos del pistón consta de dos segmentos de compresión cromados y un segmento rascador de aceite cromado y accionado por resorte. La culata, hecha de hierro fundido nodular, está fijada por cuatro tornillos apretados de forma hidráulica. La culata es de diseño de doble cubierta y el agua de refrigeración está obligada a pasar desde la periferia hacia el centro, proporcionando una refrigeración eficiente en áreas importantes.

Las válvulas de admisión están recubiertas de estelita y sus vástagos son cromados. Los asientos de las válvulas son de una aleación especial de hierro fundido, y son recambiables. Las válvulas de escape con asientos de Nimonic o estelita y vástagos cromados, cierran contra los asientos directamente refrigerados. Los anillos de asiento de un material resistente a la corrosión y a las picaduras, son intercambiables. Los árboles de levas están formados por tramos individuales para cada cilindro, con las levas integradas.

El motor está disponible en dos sistemas de inyección de combustible distintos: inyección de combustible "*common rail*" e inyección de combustible convencional.

- ✓ El sistema "*common rail*" consta de una bomba de gasóleo de alta presión de gasóleo y un acumulador de combustible para cada dos cilindros.
- ✓ El sistema de combustible convencional consta de bombas de inyección que tienen empujadores de rodillos independientes y se pueden cambiar ajustando la medida de la base con el tornillo del taqué. Las bombas y tuberías están

situadas en un espacio cerrado, aislado térmicamente para funcionar con combustibles pesados.

El turbocompresor está situado normalmente en el lado libre del motor. El enfriador del aire de carga es de tipo autoportado. El sistema de aceite lubricante incluye una bomba de engranajes, un filtro automático de aceite, un filtro centrífugo para la limpieza del aceite procedente de la descarga del filtro automático, un enfriador de aceite con válvula termostática y una electrobomba de prelubricación. El cárter de aceite está dimensionado para todo el volumen de aceite necesario y todos los números de cilindro pueden funcionar en configuración de cárter húmedo. También es posible funcionar en cárter seco.

El suministro de aire a los cilindros (sistema de arranque) es controlado mediante un distribuidor de aire de arranque, movido por el árbol de levas. El sistema de agua de refrigeración incluye bombas de agua incorporadas y válvulas termostáticas.

La instrumentación y la automatización están accionadas por el sistema de mando del motor y también puede gestionarse con el sistema de control de la planta.

Los datos de funcionamiento recomendados (aplicable al trabajo normal a velocidad nominal) se relacionan en el Anexo 1 (Manual de instrucción de Motores Wärtsilä W18V32, 2012).

Datos principales del motor

Diámetro de cilindro.	.	.	.	320 mm
Carrera	.	.	.	400 mm
Cilindrada por cada cilindro	.	.	.	32,17 litros

Condiciones de referencia, según la norma ISO 3046/I (1995)

Presión atmosférica	.	.	.	100 kPa (1,0 bar)
Temperatura ambiente.	.	.	.	298 K (25 °C)
Humedad relativa del aire	.	.	.	30%
Temperatura del agua refrigerante del enfriador de aire de carga	.	.	.	298 K (25°C)

El motor Wärtsilä W18V32 está diseñado y desarrollado para funcionar continuamente, sin reducir la potencia nominal, con combustibles fósiles con las propiedades siguientes (Tabla 2.1).

Tabla 2.1.

Límites máximos para las propiedades de los combustibles fósiles.

Características del combustible, límites máximos			
			Referencia del método de control
Viscosidad cinemática	cSt a 100 °C cSt a 50 °C Redwood núm.1 sec. a 100°F	55 700 7200	ISO 3104
Densidad	kg/m ³ a 15°C	991	ISO 3675 ó 12185
Densidad ¹⁾	kg/m ³ a 15°C	1010 ¹⁾	ISO 3675 ó 12185
Agua	% V/V	0.5	ISO 3733
Agua, máx. antes del motor	% V/V	0.3	ISO 3733
Punto de inflamación, mín. (PMCC)	°C	60	ISO 2719
Temperatura de fluidez	°C	30	ISO 3016
El potencial de sedimento total (TSP)	% mm	0.1	ISO 10307-2
Sodio	mg/kg	50	ISO 10478
Sodio, antes del motor	mg/kg	30	ISO 10478
Al + Si antes del motor	mg/kg	15	ISO 10478 ó IP 501 ó 470

Fuente: Manual de instrucción de Motores Wärtsilä W18V32, 2012.

Leyenda:

1)- Siempre y cuando el sistema de tratamiento del combustible permita eliminar agua y sólidos.

2.4. Determinación y operacionalización de variables

El acelerado incremento de la demanda de energía, debido al crecimiento de las plataformas de producción e inclusión de nuevos campos petroleros, ha conllevado a ampliar la infraestructura de la planta de generación térmica No. 2. Esto ha implicado la incorporación de nuevos motogeneradores, a los cuales por una emergencia y la premura en la instalación debido al déficit de energía y puesta en servicio lo antes posible, se realizaron las pruebas de desempeño puntuales. Actualmente, las unidades tienen diferencias en los comportamientos de sus parámetros operativos, y sufren averías recurrentes. Esta situación en el futuro puede provocar daños irreversibles, en caso de no existir una constante atención al desempeño energético de los motores de combustión interna.

En este sentido, es fundamental evaluar los parámetros fundamentales de funcionamiento de los motores de combustión interna Wärtsilä WW18V32, utilizados para la generación eléctrica, con el fin de racionalizar su operación y mejorar su rendimiento, lo cual es de gran utilidad e importancia en la empresa Petroamazonas EP.

En el diagrama Causa – Efecto se identifica las causas que motivan el problema y las consecuencias suscitadas por los mismos (Figura 2.2).

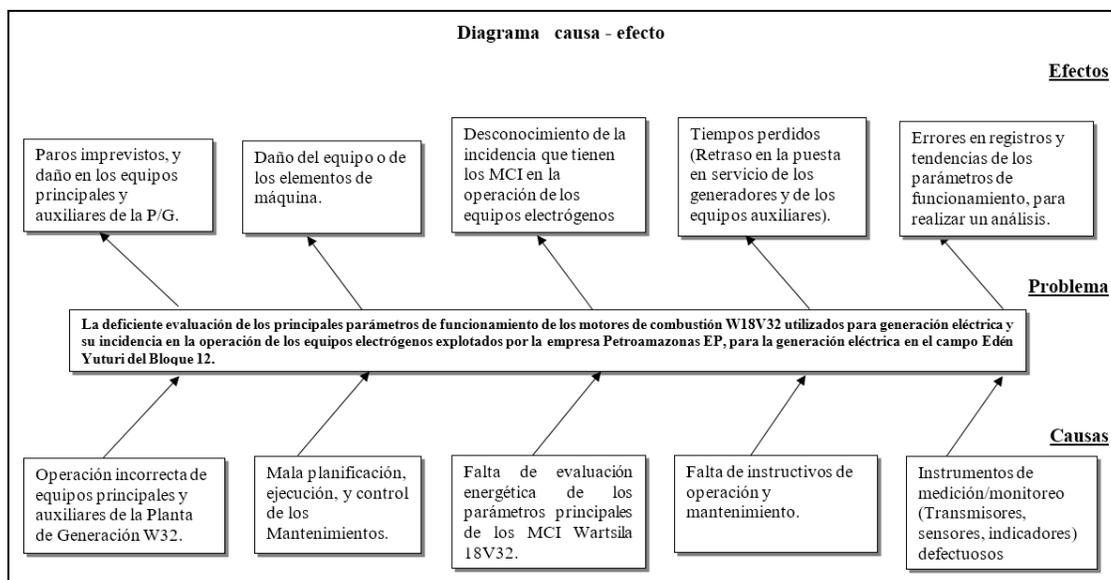


Figura 2.2. Matriz Causa–Efecto: Árbol de Problemas Asociado al Objeto de Estudio.

2.4.1. Interpretación causa - efecto

La operación incorrecta de equipos principales y auxiliares de la Planta de Generación W32, causan paros imprevistos y daño a los mismos debido a maniobras erradas rutinarias de los Técnicos operadores, causando pérdida de producción.

Una mala planificación, ejecución, y control de los mantenimientos, ocasiona daño del equipo o de los elementos de máquina y a su vez conlleva a realizar trabajos innecesarios, recurrentes y de baja calidad, además que infla el presupuesto de mantenimiento.

La falta de evaluación energética de los parámetros de funcionamiento de los motores de combustión interna Wärtsilä W18V32, repercute en el desconocimiento de la incidencia que tienen estas instalaciones en la operación de los equipos electrógenos.

La falta de instructivos de operación y mantenimiento, ocasionan tiempos perdidos (Retraso en la puesta en servicio de los generadores y de los equipos auxiliares), lo cual baja la disponibilidad de los mismos y por ende de la planta de generación.

Los instrumentos de medición/monitoreo (Transmisores, sensores, indicadores) defectuosos, ocasionan deficiencia y errores en los registros y tendencias de los parámetros de funcionamiento, lo cual dificulta realizar un análisis de las distintas variables y realizar correcciones.

De la interpretación del diagrama causa – efecto; la de causa de prioridad es la falta evaluación técnica de los parámetros de funcionamiento de los motogeneradores; y el efecto de prioridad es el desconocimiento de la incidencia que tienen estas instalaciones en la operación de los equipos electrógenos.

Variable independiente: parámetros de operación de los motores de combustión Wärtsilä W18V32 (los necesarios para la evaluación energética).

Variable dependiente: operación de los equipos electrógenos (conjunto motor-generador).

Por lo tanto, la eficiencia energética de los motores incide en la operación de los equipos electrógenos. La interacción entre las variables se operacionaliza mediante la relación causas y efectos, mostrada en el esquema de la Figura 2.2.

2.4.2. Matriz de operacionalización de variables

El proceso de operacionalización se inicia con la definición de las variables en función de los factores estrictamente medibles a los que se les llama indicadores.

El proceso obliga a realizar una definición conceptual de las variables para romper el concepto difuso que ella engloba y así darle sentido concreto dentro de la investigación, en función de ello se procede a realizar la definición operacional de la misma para identificar los indicadores que permitirán realizar su medición de forma empírica y cuantitativa, al igual que cualitativamente llegado el caso (Tabla 2.2).

Tabla 2.2.

Matriz de operacionalización de variables

VARIABLE INDEPENDIENTE: Parámetros de funcionamiento de los motores					
Concepto	Categoría	Indicadores	Ítem	Técnicas	Instrumentos y/o Ecuaciones
Valor numérico o dato fijo que se considera en el estudio o análisis de una cuestión.	Variable	Presión	bar	Medición	PID
		Temperatura	°C	Medición	TID
		Viscosidad	cSt	Medición	Viscosímetro
También se conoce como parámetro, al dato que se considera como imprescindible y orientativo para lograr evaluar o valorar una determinada situación.	Dato	Cerrado	I	Medición	Multímetro
		Abierto	0	Medición	Multímetro
		Inferior	-	Cálculo	Ecuaciones
		Fuera de rango	∞	Cálculo	Ecuaciones
VARIABLE DEPENDIENTE: Operación de los equipos electrógenos					
Concepto	Categoría	Indicadores	Ítem	Técnicas	Instrumentos y/o Ecuaciones
Rendimiento es la relación entre el trabajo neto realizado por las máquinas y el calor absorbido.	Rendimientos	Rendimiento indicado	%	Cálculo	Ecuaciones
		Rendimiento mecánico	%	Cálculo	Ecuaciones
También, se entiende por rendimiento el grado de aprovechamiento de la energía térmica		Rendimiento efectivo	%	Cálculo	Ecuaciones
		Costo de Operación	\$	Cálculo	Ecuaciones

2.5. Método de cálculo para la evaluación energética de los motores Wäertsilä W18V32

Para elaborar la metodología de cálculo, se utilizaron las expresiones contenidas en las fuentes bibliográficas especializadas (Reyes, 1983; Reyes y Alcové, 1983; Reyes *et al.*, 1983; Vega 2013), con las debidas adaptaciones a los motores de combustión interna objeto de estudio.

La ecuación general de balance térmico tiene la forma siguiente:

$$Q_0 = Q_e + Q_{ref} + Q_g + Q_{ci} + Q_{res} \quad (2.1)$$

Donde:

Q_0 : cantidad total de calor introducida en el motor por el combustible; kJ/h.

Q_e : calor equivalente al trabajo efectivo que realiza el motor; kJ/h.

Q_{ref} : calor cedido al medio refrigerante; kJ/h.

Q_g : calor que se pierde con los gases de escape; kJ/h.

Q_{ci} : calor no aprovechado por combustión incompleta; kJ/h.

Q_{res} : término que incluye las pérdidas restantes, no consideradas anteriormente; kJ/h.

Cada uno de los componentes del balance térmico se puede determinar en porcentaje del calor total entregado por el combustible (Q_0) como sigue (ecuaciones 2.2-2.6):

$$q_e = \frac{Q_e}{Q_0} \cdot 100 \quad (2.2)$$

$$q_{ref} = \frac{Q_{ref}}{Q_0} \cdot 100 \quad (2.3)$$

$$q_g = \frac{Q_g}{Q_0} \cdot 100 \quad (2.4)$$

$$q_{ci} = \frac{Q_{ci}}{Q_0} \cdot 100 \quad (2.5)$$

$$q_{res} = \frac{Q_{res}}{Q_0} \cdot 100 \quad (2.6)$$

Por lo tanto:

$$q_0 = q_e + q_{ref} + q_g + q_{ci} + q_{res} = 100\% \quad (2.7)$$

La cantidad total de calor introducida en el motor por el combustible se puede obtener mediante la ecuación 2.8.

$$Q_0 = Q_t^i \cdot G_t \quad (2.8)$$

Donde:

Q_t^i : valor calórico bajo del combustible; kJ/kg.

G_t : consumo de combustible (en este caso petróleo crudo); kg/h.

El Calor Específico de Combustión de un combustible, también conocido por Poder Calorífico o Valor Calórico, es el calor liberado durante la combustión completa de la unidad de masa del combustible. Se diferencian dos calores de combustión, dependiendo de que se condensen o no los vapores de agua presentes en los gases de combustión, en función de la temperatura final hasta que se enfríen estos (Pérez, 1972; Borroto y Rubio, 2007; Rubio, 2015).

1. Calor Específico de Combustión Superior (bruto), Q_t^s .
2. Calor Específico de Combustión Inferior (neto), Q_t^i .

Tomando en consideración que en la oxidación de una unidad de masa de hidrógeno se obtienen nueve unidades de masa de agua, y considerando un calor latente aproximado del agua a presión atmosférica y temperaturas bajas de 2500 kJ/kg, se tiene para combustibles líquidos y sólidos:

$$Q_t^i = Q_t^s - 2500 \cdot \left[\left(\frac{9 \cdot H^t}{100} \right) + \left(\frac{W^t}{100} \right) \right] \quad (2.9)$$

Donde:

Q_t^i : poder calórico inferior del combustible; kJ/kg

Q_t^s : poder calórico superior del combustible; kJ/kg

H^t : cantidad de hidrógeno en el combustible; %

W^t : cantidad de humedad en el combustible; %.

Para combustibles gaseosos la composición se especifica normalmente, en porcentaje volumétrico de los diferentes gases que lo componen, y el poder calorífico está en función de esa composición y del poder calorífico de cada componente.

La determinación del poder calorífico de un combustible se puede realizar:

Experimentalmente, mediante bombas calorimétricas.

Analíticamente, en este caso en función de la composición elemental.

Existen muchas ecuaciones de diferentes autores para determinar el poder calorífico de distintos tipos de combustibles. Un ejemplo de ellas lo constituye la expresión de Mendelejev, aplicable para combustibles sólidos y líquidos; y por consiguiente a los motores investigados (ecuación 2.10).

$$Q_t^i = 339 \cdot C^t + 1030 \cdot H^t - 109 \cdot (O^t - S^t) - 24 \cdot W^t \quad (2.10)$$

Donde:

C^t : cantidad de carbono en el combustible; %

O^t : cantidad de oxígeno en el combustible; %.

S^t : cantidad de azufre en el combustible; %.

Nota: todos los porcentajes de los elementos químicos están en masa de trabajo, o sea, son los del combustible justo como se suministra a los motores de combustión interna Wäertsilä W18V32.

Para el cálculo del calor que se convierte en trabajo efectivo, es congruente emplear la siguiente ecuación (2.11):

$$Q_e = 3600 \cdot N_e \quad (2.11)$$

Donde:

N_e : potencia efectiva del motor; kW.

Por su parte, el calor cedido al medio refrigerante se calcula mediante las ecuaciones 2.12-2.14:

$$Q_{refAT} = C_{aAT} \cdot G_{aAT} \cdot (T_{sal.AT} - T_{ent.AT}) \quad (2.12)$$

$$Q_{refBT} = C_{aBT} \cdot G_{aBT} \cdot (T_{sal.BT} - T_{ent.BT}) \quad (2.13)$$

$$Q_{ref} = Q_{refAT} + Q_{refBT} \quad (2.14)$$

Donde:

Q_{refAT} : calor cedido al medio refrigerante en el circuito de alta temperatura; kJ/h.

Q_{refBT} : calor cedido al medio refrigerante en el circuito de baja temperatura; kJ/h.

C_{aAT} y C_{aBT} : calores específicos del agua en los circuitos de alta y baja temperatura; kJ/kg·K.

G_{aAT} : flujo de agua del circuito de alta temperatura que pasa por el motor; kg/h.

G_{aBT} : flujo de agua del circuito de baja temperatura que pasa por el motor; kg/h.

$T_{sal.AT}$ y $T_{sal.BT}$: temperaturas del agua a la salida de los circuitos de alta y baja temperatura; K.

$T_{ent.AT}$ y $T_{ent.BT}$: temperaturas del agua a la entrada de los circuitos de alta y baja temperatura; K.

Para el cálculo de la cantidad de calor que se escapa con los gases de escape se emplea la expresión 2.15, propuesta por Fygueroa y Araque (2003).

$$Q_g = m \cdot cp_g \cdot (t_g - t_0) \quad (2.15)$$

Siendo:

$$m = m_a + m_c = m_a + G_t \quad (2.16)$$

La ecuación que relaciona a los términos m_a y m_c es la siguiente:

$$m_c = \phi \cdot \left(\frac{m_c}{m_a} \right)_e \cdot m_a \quad (2.17)$$

$$cp_g = 0,988 + 0,23 \cdot 10^{-3} \cdot t_g + 0,050 \cdot 10^{-6} \cdot (t_g)^2 \quad (2.18)$$

Donde:

m : flujo másico total (de aire más combustible); kg/h.

m_a : flujo másico de aire de combustión; kg/h.

m_c : flujo másico de combustible; kg/h.

cp_g : calor específico de los gases de escape; kJ/kg·K.

t_g : temperatura de los gases de escape; K.

t_0 : temperatura del ambiente; K.

ϕ : relación combustible aire relativa (dosado relativo o riqueza de la mezcla);
adimensional.

$\left(\frac{m_c}{m_a}\right)_e$: relación combustible aire estequiométrica (dosado estequiométrico);
adimensional.

El calor no aprovechado por combustión incompleta (Q_{ci}) se incluye dentro del cálculo de las pérdidas restantes (Q_{res}). Entonces, las pérdidas de calor restantes no cuantificadas se calculan por la ecuación 2.19.

$$Q_{res} = Q_0 - (Q_e + Q_{ref} + Q_g) \quad (2.19)$$

2.5.1. Método de cálculo para parámetros indicados, efectivos y pérdidas mecánicas

En la teoría de los motores de combustión se analizan los parámetros que caracterizan al ciclo real y al trabajo del motor (Reyes, 1983; Reyes *et al.*, 1983). Los primeros son los “indicados” (el trabajo indicado, la presión media indicada, el rendimiento indicado, la potencia indicada y el consumo específico indicado de combustible) y los segundos son los “efectivos” (la presión media efectiva, el rendimiento efectivo, la potencia efectiva y el consumo específico efectivo de combustible).

2.5.1.1. Parámetros indicados

El trabajo indicado se obtiene del diagrama indicado del motor, este trabajo no puede ser completamente aprovechado en el eje del motor, parte del mismo se pierde en fricción, en mover equipos auxiliares. Por su parte, la presión media indicada de un MCI se obtiene dividiendo el trabajo por el volumen de desplazamiento.

La potencia que proporciona el motor calculada a partir de la presión media del fluido de trabajo en los cilindros y el desplazamiento se denomina potencia indicada.

El rendimiento indicado permite conocer el grado de aprovechamiento del calor que suministra el combustible al cilindro. El aumento del rendimiento indicado, implica un mejor aprovechamiento del calor en el cilindro del motor.

Si la potencia indicada y la cantidad de combustible de un motor se conocen o se determinan en una prueba, se puede encontrar el consumo específico indicado de combustible. Este proporciona la economía del motor.

El aprovechamiento del calor en los motores solamente puede valorarse de acuerdo con el consumo de combustible, si sus parámetros se comparan cuando este usa el mismo combustible. De no ser así, el aprovechamiento del calor se determina sobre la base del rendimiento indicado.

Factores que influyen en los parámetros indicados de los motores Diésel

La calidad de la formación de la mezcla en un motor Diésel depende de varios factores:

- a. La característica de la inyección del combustible.
- b. La organización de un flujo de aire dirigido durante la inyección.
- c. El método de formación de la mezcla. El uso de uno de estos asegura un alto desarrollo del ciclo y parámetros indicados óptimos, solo si el flujo de aire y la inyección de combustible están adecuadamente organizados.
- d. Los parámetros termodinámicos del medio.
- e. Las propiedades del combustible.

Los parámetros indicados dependen del tipo de cámara de combustión y del sistema de alimentación. Estos influyen en el curso del proceso de combustión, la naturaleza de la evolución del calor y las pérdidas térmicas e hidrodinámicas en el ciclo.

2.5.1.2. *Parámetros efectivos*

La presión media efectiva representa el trabajo efectivo por unidad de volumen de desplazamiento y la potencia efectiva, es aquella que está disponible a la salida del eje motor, a diferencia de la potencia indicada. Es la potencia neta disponible de la máquina, también se le denomina potencia al freno, ya que en general esta potencia se mide con un dispositivo colocado en el eje del motor y denominado freno.

El rendimiento mecánico da idea de la cantidad de pérdidas mecánicas que se producen en un motor. Por lo tanto, a medida que el rendimiento mecánico aumenta, disminuyen las pérdidas mecánicas; el rendimiento mecánico varía con la carga y aumenta a medida que esta es mayor.

El rendimiento efectivo permite medir el aprovechamiento del calor que suministra el combustible en el motor. El trabajo efectivo es el que se puede aprovechar en el eje del cigüeñal. También, al igual que en el caso del consumo específico indicado se puede calcular el consumo específico efectivo y es el consumo de combustible durante el trabajo del motor.

2.5.1.3. *Cálculo de los parámetros indicados y efectivos*

La presión media indicada se calcula a través de la ecuación 2.20:

$$p_{mi} = \frac{N_i}{Z \cdot V \cdot \frac{n}{60} \cdot \frac{1}{2}} \quad (2.20)$$

Donde:

p_{mi} : presión media indicada; Pa.

N_i : potencia indicada del motor; kW.

Z : número de cilindros del motor; adimensional.

V : cilindrada total; m³.

n : número de revoluciones del cigüeñal; rpm.

Para el cálculo de la presión media efectiva se emplea la ecuación 2.21:

$$pme = \frac{N_e}{Z \cdot V \cdot \frac{n}{60} \cdot \frac{1}{2}} \quad (2.21)$$

Donde:

pme : presión media efectiva; Pa.

Se puede obtener el trabajo indicado como se muestra (ecuación 2.22):

$$Wi = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot C \cdot pmi \quad (2.22)$$

Donde:

Wi : trabajo indicado; J.

D : diámetro del cilindro; m.

C : carrera del pistón; m.

La ecuación para el trabajo efectivo es:

$$We = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot C \cdot pme \quad (2.23)$$

Donde:

We : trabajo efectivo; J.

El consumo indicado y efectivo de combustible se determina por las expresiones 2.24 y 2.25.

$$g_i = \frac{G_t}{N_i} \cdot 10^3 \quad (2.24)$$

$$g_e = \frac{G_t}{N_e} \cdot 10^3 \quad (2.25)$$

Donde:

g_i : consumo específico indicado de combustible; g/kW·h.

g_e consumo específico efectivo de combustible, g/kW·h.

Los rendimientos (indicado, mecánico y efectivo) se calculan por las ecuaciones 2.26-2.28.

Rendimiento indicado η_i (%):

$$\eta_i = \frac{3600}{Q_t^i \cdot g_i} \cdot 100 \quad (2.26)$$

Rendimiento mecánico η_m (%):

$$\eta_m = \frac{N_e}{N_i} \cdot 100 \quad (2.27)$$

Rendimiento efectivo η_e (%):

$$\eta_e = \frac{\eta_i \cdot \eta_m}{100} \quad (2.28)$$

2.5.1.4. Pérdidas mecánicas

Una parte del trabajo indicado, no se aprovecha en el eje del motor, porque se gasta en vencer las pérdidas mecánicas que se producen. Para que un motor pueda funcionar cíclicamente es necesario consumir energía, lo que se debe al rozamiento en las piezas móviles conjugadas, por ejemplo: entre el cilindro y el émbolo con sus segmentos, entre el cigüeñal y los cojinetes. También al intercambio de gases, al accionamiento de los mecanismos auxiliares y para accionar el compresor.

Las pérdidas mecánicas dependen del tipo del motor, diámetro del cilindro, carrera del émbolo, regímenes de velocidad y de carga y de las condiciones de explotación. La pérdida de potencia debido a las mismas es la suma de: la potencia que se gasta en vencer el rozamiento; en mover los mecanismos auxiliares y la que se invierte en admisión de la carga fresca y en el escape de los gases quemados en el cilindro.

Cálculo de las pérdidas mecánicas

La presión de las pérdidas mecánicas, para los motores de Diésel se determina por:

$$Pm' = a + b \cdot Vm \quad (2.29)$$

Siendo a y b coeficientes que dependen del tipo de motor, se determinan experimentalmente. En este caso particular pueden asumirse los valores siguientes (Reyes, 1983; Reyes y Alcove, 1983):

$$Pm' = 0,105 + 0,012 \cdot Vm \quad (2.30)$$

Siendo:

$$Vm = \frac{C \cdot n}{30} \quad (2.31)$$

Donde:

Pm' : presión de las pérdidas mecánicas; MPa.

Vm : velocidad media del émbolo; m/s

Por su parte, la potencia que se consume en las pérdidas mecánicas, para los motores analizados, se calcula por la ecuación 2.32.

$$N_m = \frac{Pm' \cdot V \cdot Z \cdot n}{30 \cdot \tau} \quad (2.32)$$

Siendo:

$$V = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot Z \cdot C \quad (2.33)$$

N_m : Potencia que se consume en las pérdidas mecánicas; kW.

τ : tiempos del motor; adimensional.

El **cálculo del consumo específico de crudo** de los motores de combustión se realizó siguiendo el protocolo que establece la norma ISO 15550, la cual es empleada por la Compañía Wärtsilä para el análisis de los motores W18V32 (ver Anexo 2). Además, para demostrar la veracidad del método empleado por Wärtsilä, se empleó la metodología

propuesta por Vega (2013), basada en la norma ISO 3046. La misma considera las condiciones de garantía ofrecidas por el vendedor (por la norma ISO 3046) y las que se obtienen durante la prueba experimental (ver epígrafe 4.6.1).

2.6. Técnicas de medición utilizadas

La obtención de datos durante el proceso de trabajo del grupo electrógeno se realiza de forma manual y también automática; es decir, una parte de los datos los obtiene el operador directamente en los instrumentos locales del motor y la otra parte lo suministra el sistema automático del motor que está constituido por un sistema de control, monitoreo y seguridad instalado sobre un autómatas. Los sensores, indicadores y actuadores están instalados en el motor y distribuidos por todo el campo en dependencia de su función y objeto de medición. Los datos se almacenan en una computadora a través del Sistema de Control y Monitoreo.

En estas instalaciones se miden, entre otros, los siguientes parámetros: presión y temperatura del aceite lubricante; presión del líquido refrigerante; temperatura y presión del aire de sobrealimentación; velocidad de rotación del cigüeñal; temperatura y nivel del líquido del refrigerador de aire de sobrealimentación; temperatura y presión de combustible; nivel de líquido refrigerante del motor; temperatura de los gases de salida de los cilindros; factor de potencia; y potencias activa y reactiva.

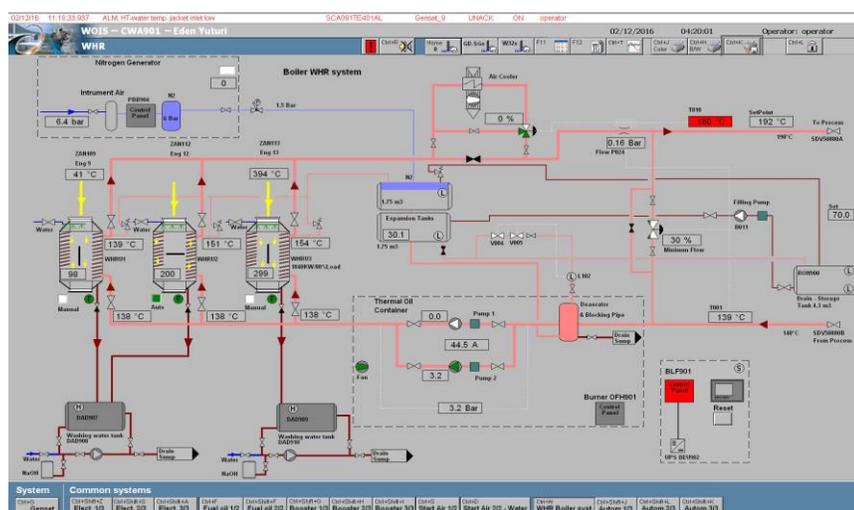


Figura 2.3. Sistema de adquisición de datos empleado en la planta de generación.

Fuente: Rodríguez, 2016.

La instalación está dotada de equipos y accesorios que permiten mayor calidad en el registro y control de las variables y su procesamiento posterior, mediante el programa de adquisición de datos *Factory Talk de Allen Bradley* (Figura 2.3).

2.6.1. Tipo de experimento realizado

En las investigaciones científicas contemporáneas pueden ser empleados diversos tipos de diseños de experimentos (Guzmán, 1986; Guerra *et al.*, 2003; Montgomery, 2004). Sin embargo, debido a las características de la instalación de generación térmica (que es de operación continua, donde las exigencias del proceso productivo no permiten modificar los parámetros de funcionamiento de los motores) no se aplicó ningún diseño específico, pero se desarrollaron mediciones de campo y se contó además con los datos registrados, durante todo el año 2016, para las variables de interés.

En la literatura se estudian los errores y las posibles fuentes que lo originan, se especifican los valores satisfactorios de desviación que se aceptan en cálculos de ingeniería (Miller *et al.*, 2005; Legrá y Silva, 2011). Para mitigar los errores la evaluación energética de los motores de combustión se realizó con los valores promedios correspondientes al año 2016, esto le confiere representatividad a los datos empleados en el balance energético de los motogeneradores.

Los errores relativos puntuales y promedios, entre los valores experimentales y los teóricos, se calculan por las ecuaciones generales 2.34 y 2.35, respectivamente (Tijonov, 1978; Tijonov y Samarky, 1980; Lucenko, 1984; Stewart, 2009).

$$E_{Puntual} = \left| \frac{[V_{Parámetro}]_{Experimental.} - [V_{Parámetro}]_{Teórico.}}{[V_{Parámetro}]_{Experimental.}} \right| \cdot 100 \quad (2.34)$$

$$E_P = \sum_{i=1}^{N_d} \left| \frac{[V_{Parámetro}]_{Experimental.} - [V_{Parámetro}]_{Teórico.}}{[V_{Parámetro}]_{Experimental.}} \right| \cdot \frac{100}{N_d} = \quad (2.35)$$

Donde:

$E_{Puntual}$: error relativo puntual entre los valores experimentales y los teóricos; %.

$[V_{Parámetro}]_{Experimental.}$: valor del parámetro medido experimentalmente; con la unidad correspondiente.

$[V_{\text{Parámetro}}]_{\text{Teórico}}$: valor del parámetro obtenido teóricamente; con la unidad correspondiente.

E_p : error relativo promedio entre los valores experimentales y los teóricos; %.

N_d : número de determinaciones; adimensional.

2.7. Conclusiones del capítulo 2

- ✦ Quedaron establecidos los procedimientos para el cálculo de los parámetros fundamentales de funcionamiento de los motores de combustión interna Wärtsilä W18V32. Los mismos integran diversos aspectos teóricos y metodológicos de investigaciones precedentes y se obtienen del balance de energía en el motor, por tanto, son útiles para los propósitos de esta investigación.
- ✦ Los motogeneradores Wärtsilä W18V32, explotados para la generación eléctrica en el campo Edén Yuturi del Bloque 12 de Petroamazonas EP, están dotados de equipos que garantizan precisión en el control y registro de las variables, mediante un programa de adquisición de datos diseñado para la planta térmica. Lo anterior, unido a las técnicas de medición aplicadas, garantizan confiabilidad en los datos usados en la evaluación energética de los motores.

CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LA EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA WÄRTSILÄ W18V32. CASO DE ESTUDIO MOTOGENERADOR ZAN-110

3.1. Introducción al capítulo

La producción de electricidad en las plantas térmica se desarrolla bajo disímiles condiciones de explotación. El estudio de los equipos fundamentales del proceso, y particularmente los motogeneradores, en estas circunstancias resulta de gran interés desde el punto de vista científico-técnico y práctico. En el presente capítulo se exponen los resultados obtenidos en la evaluación energética de los parámetros fundamentales de motores de combustión interna Wärtsilä W18V32 explotados por la empresa Petroamazonas EP, para la generación eléctrica en el campo Edén Yuturi del Bloque 12. Además, se valoran criterios económicos y ambientales relacionados con el trabajo de las instalaciones.

El **objetivo** del capítulo es: analizar los resultados obtenidos en la evaluación energética del motor de combustión interna Wärtsilä W18V32 (ZAN-110) y los impactos económico-ambientales asociados al funcionamiento de este equipo.

3.2. Principales parámetros medidos en el motogenerador Wärtsilä W18V32

Como se ha indicado en el capítulo precedente, los motores de combustión interna Wärtsilä W18V32 cuentan con un eficiente sistema de medición y control de sus parámetros fundamentales de funcionamiento. Lo anterior permite la obtención de los datos necesarios para la evaluación energética de estas instalaciones.

En el presente capítulo, para implementar los procedimientos expuestos en la investigación (en el capítulo 2 y en el epígrafe 4.6.1) para la evaluación energética de los motogeneradores, se seleccionó el motor de combustión Wärtsilä W18V32 ZAN-110 (en lo adelante MCI-10). Se escogió este motor porque en la investigación de campo realizada se comprobó que fue el que menos potencia produjo de los de los cuatro motogeneradores de la planta W32 que están operando desde el año 2012 (montaje), además posee un sistema de adquisición de datos confiable y está dotado de la instrumentación que se requiere para el diagnóstico energético. Los valores de los

parámetros de funcionamiento de la instalación (para las variantes de cálculo analizadas) se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1.

Parámetros de funcionamiento medidos y/o calculados en el MCI-10.

Parámetros obtenidos en la instalación Año: 2016	Motor Wärtsilä W18V32 (MCI-10)					
	Periodo: Enero - Junio					
	V-01	V-02	V-03	V-04	V-05	V-06
Variantes calculadas (Variante-Número) ⇒						
Carga de trabajo del MCI (%)	52	58	77	79	81	83
Poder calórico bajo del combustible (kJ/kg)	41030	41030	41030	41030	41030	41030
Consumo de combustible (kg/h)	1100	1180	1300	1340	1360	1380
Potencia efectiva del motor (kW)	4212	4698	6237	6388	6587	6710
Potencia indicada del motor (kW)	7660	7660	7660	7660	7660	7660
Flujo de agua, circuito de alta temperatura; AT (kg/h)	25717	25717	25717	25717	25717	25717
Temperatura del agua, salida de circuito AT (K)	366	369	371	373	372	371
Temperatura del agua, entrada de circuito AT (K)	358	358	358	358	358	358
Flujo de agua, circuito de baja temperatura; BT (kg/h)	21366	21366	21366	21366	21366	21366
Temperatura del agua, salida de circuito BT (K)	348	349	350	351	351	350
Temperatura del agua, entrada de circuito BT (K)	305	305	305	305	305	305
Temperatura de los gases de escape (K)	688	689	691	692	691	693
Parámetros obtenidos en la instalación Año: 2016	Motor Wärtsilä W18V32 (MCI-10)					
	Periodo: Julio - Diciembre					
	V-07	V-08	V-09	V-10	V-11	V-12
Variantes calculadas (Variante-Número)						
Carga de trabajo del MCI (%)	84	85	85	84	80	79
Poder calórico bajo del combustible (kJ/kg)	41030	41030	41030	41030	41030	41030
Consumo de combustible (kg/h)	1400	1400	1410	1380	1350	1350
Potencia efectiva del motor (kW)	6804	6923	6906	6802	6481	6399
Potencia indicada del motor (kW)	7660	7660	7660	7660	7660	7660
Flujo de agua, circuito de alta temperatura; AT (kg/h)	25717	25717	25717	25717	25717	25717
Temperatura del agua, salida de circuito AT (K)	370	371	372	372	370	370
Temperatura del agua, entrada de circuito AT (K)	358	358	358	358	358	358
Flujo de agua, circuito de baja temperatura; BT (kg/h)	21366	21366	21366	21366	21366	21366
Temperatura del agua, salida de circuito BT (K)	349	350	351	351	350	351
Temperatura del agua, entrada de circuito BT (K)	305	305	305	305	305	305
Temperatura de los gases de escape (K)	693	693	694	694	693	692

Continuación de la Tabla 3.1.

Parámetros obtenidos en la instalación	Motor Wärtsilä W18V32 (MCI-10)
Año: 2016	Periodo: Enero - Diciembre
Datos generales del motor que aplican a las 12 variantes	
Relación aire combustible (adimensional)	0,0714
Número de cilindros del MCI (adimensional)	18
Número de revoluciones del cigüeñal (rpm)	720
Diámetro del cilindro (m)	0,32
Carrera del pistón (m)	0,4
Tiempos del motor (adimensional)	4

Nota: las propiedades termodinámicas y termofísicas de agua se determinaron según sugiere Vukalovitch (1978).

Como se aprecia en la tabla anterior, el MCI-10 trabajó todo el año con cargas inferiores al 100 %. Este aspecto incide negativamente en su desempeño energético. Por otra parte, la relación combustible-aire fue de 1/14 (0,0714). Este valor se encuentra en el rango establecido para los motores diésel, según la literatura consultada (Reyes *et al.*, 1983; Fygueroa y Araque, 2003).

Las principales propiedades termofísicas y químicas del combustible crudo se relacionan a continuación (Tabla 3.2), excepto el poder calórico inferior que se encuentra en la Tabla 3.1.

Tabla 3.2.

Propiedades termofísicas y químicas del crudo utilizado en el MCI-10.

Determinación	Valor	Unidad de medida
Viscosidad Cinemática a 50 °C	117,19	cSt
Agua por destilación	0,15	%V
Azufre	1,9677	%P
Cenizas	0,0672	%P
Vanadio	98,945	mg/kg
Sodio	6,764	mg/kg
Aluminio	2,684	mg/kg
Silicio	0,000	mg/kg
Calcio	3,397	mg/kg
Potasio	1,070	mg/kg
Magnesio	1,278	mg/kg
Residuo Carbonoso	12,40	%P
Asfaltenos en C ₇	10,5699	%P
Presión de vapor REID	82,74	kPa
Punto de escurrimiento	-21	°C

<i>Continuación de la Tabla 3.2.</i>		
Determinación	Valor	Unidad de medida
Punto de inflamación	45,2	°C
Sedimento básico y agua	0,2	%V
Densidad relativa	934,6	kg/m ³

Los valores mostrados en la Tabla 3.2 se obtuvieron aplicando diferentes métodos estandarizados de determinación. Se empleó el laboratorio del Departamento de Petróleos, Energía y Contaminación de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Central del Ecuador. El mismo está acreditado por el SAE (acreditación No. OAE LE 2C 06-010). Tanto los métodos, como el laboratorio están avalados por la comunidad científica internacional. Se destacan los altos niveles de Vanadio, que al combustionar el combustible provoca daños a las superficies de intercambio de calor y afectan el rendimiento térmico del MCI-10.

Por su parte, la composición química de los gases de escape se midieron *in situ* (en el MCI-10), para ello se empleó un analizador de gases debidamente calibrado y en buen estado técnico. Se realizaron mediciones todo el año y en la Tabla 3.3 se muestran los valores promedios obtenidos en cada mes.

Tabla 3.3.

Análisis químico de los gases producto de la combustión del MCI-10.

Año: 2016	Composición química de los gases producto de la combustión						
	Meses analizados	Variantes asociadas	Motor Wärtsilä W18V32 (MCI-10)				
			O₂ (%)	CO₂ (%)	CO (ppm)	SO₂ (ppm)	NO (ppm)
Enero	V-01	12,19	6,66	164,5	537,5	804	< 10
Febrero	V-02	12,19	6,655	183,5	511,5	831	< 10
Marzo	V-03	12,14	5,195	180,5	523	826	< 10
Abril	V-04	12,18	6,17	176	524	820	< 10
Mayo	V-05	12,71	6,26	178	452	775,5	< 10
Junio	V-06	12,82	6,165	175	443	708	< 10
Julio	V-07	12,75	6,235	171,5	431	683	< 10
Agosto	V-08	12,76	6,22	174,8	442	722,1	< 10
Septiembre	V-09	13,35	5,745	144	428	720,5	< 10
Octubre	V-10	13,34	5,75	145	426,5	709,5	< 10
Noviembre	V-11	13,46	5,66	144,5	409,5	700,5	< 10
Diciembre	V-12	13,39	5,72	144,5	421,3	710,17	< 10

Los valores de los parámetros de funcionamiento expuestos en las Tablas 3.1-3.3 son los resultados promedios de las mediciones realizadas durante todo el año 2016, Cada variante corresponde a un mes (iniciando por enero) y el valor mostrado en las tablas es el promedio del mes.

Adicionalmente, para implementar los procedimientos establecidos en las normas ISO 15550 y 3046 (ver Anexo 2 y epígrafe 4.6.1), se requieren los parámetros meteorológicos: presión barométrica y temperatura del aire ambiente. Estas variables se midieron para todos los meses del año 2016.

Tabla 3.4.

Parámetros meteorológicos medidos en el Campo Edén Yuturi del Bloque 12.

Parámetros meteorológicos medidos Año: 2016	Campo Edén Yuturi del Bloque 12 Periodo: Enero - Junio					
Variantes calculadas (Variante-Número) ⇒	V-01	V-02	V-03	V-04	V-05	V-06
Temperatura del aire ambiente (K)	298,15	299,15	296,15	297,15	298,15	298,15
Presión barométrica (hPa)	1057	1050	1051	1056	1050	1049

Parámetros meteorológicos medidos Año: 2016	Campo Edén Yuturi del Bloque 12 Periodo: Julio - Diciembre					
Variantes calculadas (Variante-Número) ⇒	V-07	V-08	V-09	V-10	V-11	V-12
Temperatura del aire ambiente (K)	296,15	299,15	298,15	297,15	298,15	299,15
Presión barométrica (hPa)	1058	1051	1559	1055	1051	1055

3.3. Resultados obtenidos en la evaluación energética del MCI-10

En la Tabla 3.5 se exponen los resultados obtenidos en la evaluación energética del motor de combustión interna ZAN 110 (MCI-10). En general, se observa un adecuado desempeño energético del motogenerador a pesar no haber trabajado al 100 % de carga en ninguno de los meses del año (Tabla 3.1). Bajo estas circunstancias los valores promedios de los rendimientos (indicado, mecánico y efectivo) calculados se consideran racionales, de acuerdo con las observaciones encontradas en la literatura científica consultada (Reyes *et al.*, 1983; Reyes y Alcove, 1985; Fygueroa y Araque, 2003). Estos

autores recomiendan trabajar los motores al máximo de carga y a los parámetros nominales, siempre que sea posible.

Tabla 3.5.

Resultados de los parámetros fundamentales obtenidos en el MCI-10.

Año: 2016	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Motor Warsila W18V32 (MCI-10)						
Variantes calculadas (Periodo: Enero – Junio)						
Parámetros ↓	V-01	V-02	V-03	V-04	V-05	V-06
Q_o (kJ/h)	45133000,00	48415400,00	53339000,00	54980200,00	55800800,00	56621400,00
Q_e (kJ/h)	15163200,00	16912800,00	22453200,00	22995379,31	23712713,40	24155583,74
Q_{ref} (kJ/h)	3021586,44	5166072,94	5471756,81	5777440,67	5669275,81	5471756,81
Q_g (kJ/h)	7528641,26	8078241,87	9018463,78	9298330,19	9386929,93	9578339,23
Q_{res} (kJ/h)	19419572,31	18258285,19	16395579,42	16909049,83	17031880,86	17415720,23
q_e (%)	33,60	34,93	42,10	41,82	42,50	42,66
q_{ref} (%)	6,69	10,67	10,26	10,51	10,16	9,66
q_g (%)	16,68	16,69	16,91	16,91	16,82	16,92
q_{res} (%)	43,03	37,71	30,74	30,75	30,52	30,76
V (m ³)	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58
p_{mi} (Pa)	122,55	122,55	122,55	122,55	122,55	122,55
p_{me} (Pa)	67,38	75,16	99,78	102,19	105,38	107,35
W_i (J)	3,94	3,94	3,94	3,94	3,94	3,94
W_e (J)	2,17	2,42	3,21	3,29	3,39	3,45
g_i (g/kW·h)	143,60	154,05	169,71	174,93	177,55	180,16
g_e (g/kW·h)	261,16	251,17	208,43	209,78	206,47	205,67
η_i (%)	61,10	56,96	51,70	50,16	49,42	48,70
η_m (%)	54,99	61,33	81,42	83,39	85,99	87,60
η_e (%)	33,60	34,93	42,10	41,82	42,50	42,66
V_m (m/s)	9,60	9,60	9,60	9,60	9,60	9,60
P_m' (MPa)	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
N_m (kW)	13,76	13,76	13,76	13,76	13,76	13,76
Año: 2016	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Motor Warsila W18V32 (MCI-10)						
Variantes calculadas (Periodo: Julio – Diciembre)						
Parámetros ↓	V-07	V-08	V-09	V-10	V-11	V-12
Q_o (kJ/h)	57442000,00	57442000,00	57852300,00	56621400,00	55390500,00	55390500,00
Q_e (kJ/h)	24494400,00	24921302,49	24863365,74	24488538,01	23331262,18	23037622,95
Q_{ref} (kJ/h)	5274237,80	5471756,81	5669275,81	5669275,81	5363591,95	5452946,09
Q_g (kJ/h)	9766356,52	9692555,34	9813847,40	9629297,30	9370114,46	9320289,22
Q_{res} (kJ/h)	17907005,68	17356385,36	17505811,04	16834288,88	17325531,42	17579641,74
q_e (%)	42,64	43,39	42,98	43,25	42,12	41,59
q_{ref} (%)	9,18	9,53	9,80	10,01	9,68	9,84
q_g (%)	17,00	16,87	16,96	17,01	16,92	16,83

Continuación de la Tabla 3.5.

Año: 2016	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Motor Warsila W18V32 (MCI-10)						
Variantes calculadas (Periodo: Julio – Diciembre)						
Parámetros↓	V-07	V-08	V-09	V-10	V-11	V-12
q_{res} (%)	31,17	30,22	30,26	29,73	31,28	31,74
V (m ³)	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58
p_{mi} (Pa)	122,55	122,55	122,55	122,55	122,55	122,55
p_{me} (Pa)	108,85	110,75	110,49	108,83	103,68	102,38
W_i (J)	3,94	3,94	3,94	3,94	3,94	3,94
W_e (J)	3,50	3,56	3,55	3,50	3,33	3,29
g_i (g/kW·h)	182,77	182,77	184,07	180,16	176,24	176,24
g_e (g/kW·h)	205,76	202,24	204,16	202,87	208,30	210,96
η_i (%)	48,01	48,01	47,67	48,70	49,78	49,78
η_m (%)	88,83	90,37	90,16	88,80	84,61	83,54
η_e (%)	42,64	43,39	42,98	43,25	42,12	41,59
V_m (m/s)	9,60	9,60	9,60	9,60	9,60	9,60
Pm' (MPa)	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
N_m (kW)	13,76	13,76	13,76	13,76	13,76	13,76

3.4. Comportamiento de los parámetros energéticos fundamentales

Como se mencionó en el capítulo precedente (en el procedimiento de cálculo), durante el trabajo de un motor de combustión interna se generan varios calores que se convierten en trabajo neto y pérdidas. Estos deben ser considerados en la evaluación energética de los motogeneradores Wärtsilä W18V32. En la Tabla 3.5 se exponen los valores puntuales calculados para las variables de interés. Sin embargo, en este epígrafe se analizan los comportamientos de los parámetros fundamentales.

3.4.1. Comportamiento de los flujos de calor

Como se aprecia, la potencia calorífica aportada por el combustible durante la combustión osciló entre los 45000 y 58000 MJ/h, aproximadamente (Figura 3.1). Este comportamiento es razonablemente bueno y está determinado, fundamentalmente, por el poder calórico inferior del crudo utilizado, el cual solo se diferencia en 3,91 % del valor de referencia establecido en las normas ISO 15550 y 3046 para la explotación de los MCI, que es 42,7 MJ/kg (Anexo 2).

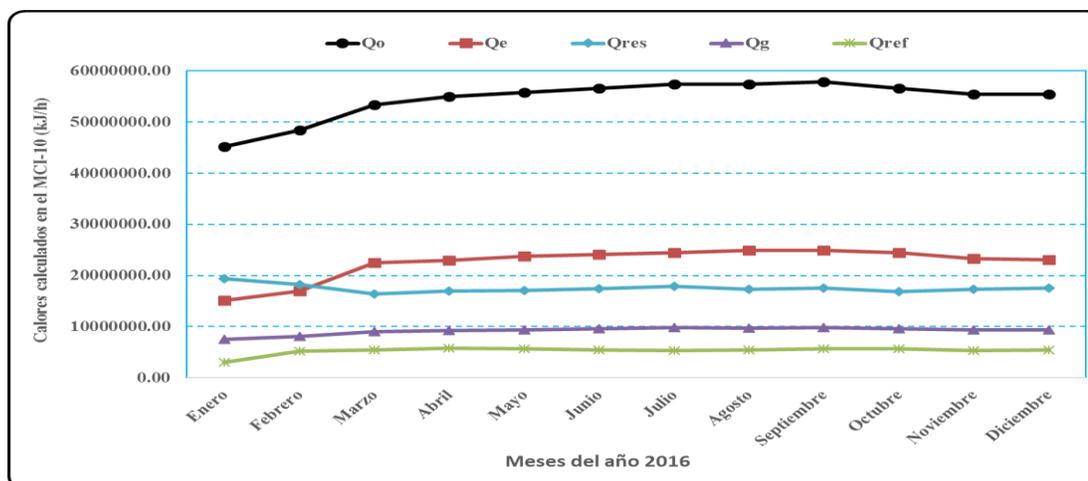


Figura 3.1. Comportamiento de los calores presentes durante el trabajo del MCI-10.

El calor equivalente al trabajo efectivo realizado por el MCI-10 alcanzó valores elevados que oscilaron entre 15000 y 24000 MJ/h (con valor medio de 22544,11 MJ/h), además, tuvo un comportamiento estable, sobre todo a partir del mes de marzo. Lo anterior se debió al valor de la potencia efectiva desarrollada por el motor, la cual osciló entre 4212 y 6923 kW, siendo 6262,25 kW su valor promedio para el año. Este valor representa el 77,31 % de la potencia nominal del MCI.

Los calores asociados a los gases de escape y al sistema de enfriamiento tuvieron tendencias similares y sus valores promedios alcanzaron los 9206,78 y 5289,91 MJ/h. En el caso del primero, su valor es atribuible a los flujos de aire y combustible con que trabaja la instalación (la relación aire/combustible), que determinan los flujos de gases, también, tuvo una incidencia notable la temperatura de los gases, cuyo valor promedio fue de 692,07 K.

Por su parte, el calor restante promedio fue de 17494,90 MJ/h. En este término tiene un rol importante el calor disipado del motor al ambiente, este no es fácil de evaluar, porque no se dispone de modelos matemáticos para el cálculo de la transferencia de calor entre el motor y su ambiente y usualmente se hace uso de las expresiones de convección natural aplicadas a las superficies externas del motor. Sin embargo, se debe tener en cuenta que, dependiendo de la aplicación, la transferencia de calor entre el motor en su conjunto y su alrededor es compleja, a este aspecto se ha referido con profundidad otros investigadores, particularmente Romero (2009).

El tema del porcentaje que representa cada uno de los calores de la potencia calorífica disponible en el combustible ha sido tratado en la literatura. De forma general, se reporta que en los motores alternativos la energía se descompone casi por partes iguales entre el trabajo útil, el calor evacuado con el refrigerante y el calor fugado con los gases de escape, con proporciones mayores de pérdidas a bajas cargas (Heywood, 1988). Las proporciones varían en función de la aplicación del motor, de su tecnología y también de la potencia del mismo. A mayores potencias se suele tener menos pérdidas relativas de calor disipado al refrigerante (Romero, 2009).

En consideración a las tendencias de control de la combustión y de la renovación de la carga del motor Diesel y a la gestión térmica del motor, la distribución porcentual de la energía aportada con el combustible en condiciones nominales de operación, se aproxima a la siguiente (válida para los MCI en el año 2009): calor transformado en potencia efectiva (42 %), calor en los gases de escape (19 %), calor al refrigerante (15 %), calor en el enfriador de gases de escape recirculados (13 %), calor en el enfriador del aire de admisión (8 %) y calor perdido en fricción/radiación (3 %).

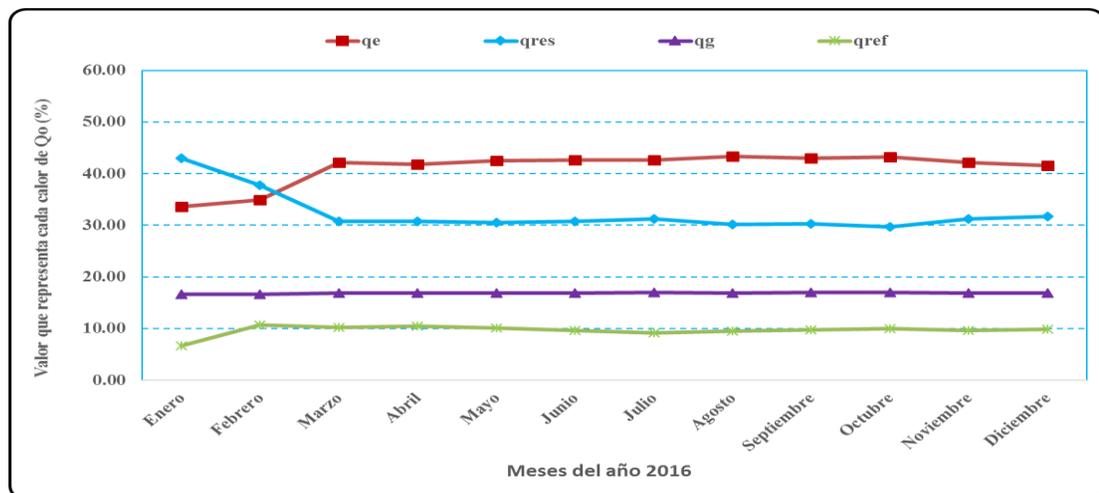


Figura 3.2. Comportamiento de los calores vs. potencia calorífica del combustible.

En la Figura 3.2 se muestra el comportamiento para el motor analizado (el MCI-10) y la distribución, en sus valores promedios, fue la siguiente (Tabla 3.5): calor transformado en potencia efectiva (41,13 %), calor en los gases de escape (16,88 %), calor transferido al refrigerante (9,67 %) y los calores restantes (32,32 %). Como se aprecia, existe una

adecuada correspondencia con los resultados obtenidos en investigaciones precedentes (Romero, 2009). En algunos meses (marzo, mayo-noviembre) se observa un mejor desempeño energético del MCI-10, el cual es más moderno con fecha de fabricación y puesta en explotación en el año 2012.

3.4.2. Comportamiento de los rendimientos

El rendimiento indicado del motor depende de varios parámetros, pero los más importantes son: la potencia indicada, el valor calórico inferior del combustible y el consumo de crudo. La relación con el primero es directamente proporcional, mientras que con los dos últimos es contraria a la anterior. De esta forma, conviene que el motor consuma la menor cantidad de crudo posible porque potencialmente se incrementaría el rendimiento indicado del mismo.

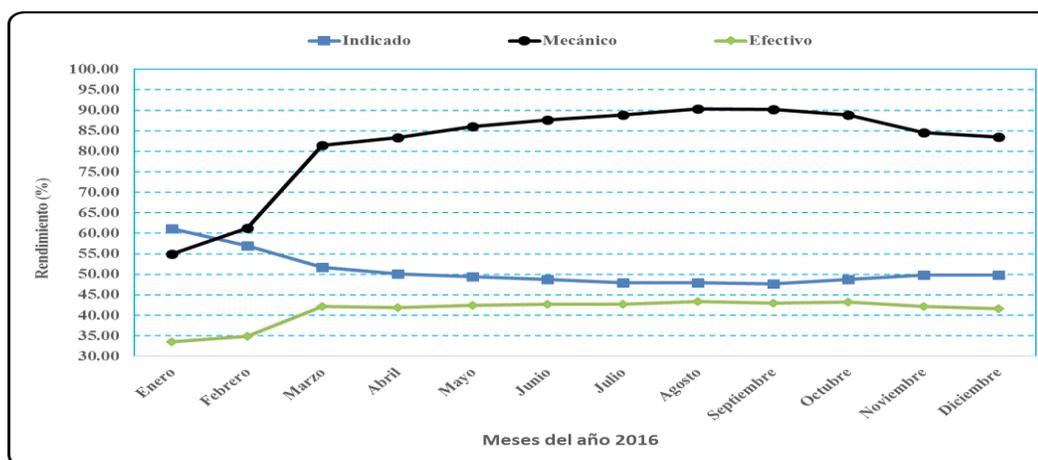


Figura 3.3. Comportamiento de los rendimientos del MCI-10.

En el caso estudiado (MCI-10) el rendimiento indicado osciló entre 47,67 y 61,10 % (con 50,83 %, como valor promedio). Lo anterior estuvo determinado, entre otros factores, por la potencia indicada, la cual fue de 7660 kW y por los adecuados comportamientos en el consumo de crudo y el poder calórico bajo del mismo (Figura 3.3). Por su parte, el rendimiento mecánico mantuvo valores superiores al 80 % a partir de marzo (con 81,75 % como valor medio para el año), influenciados por la potencia efectiva que desarrolló la máquina térmica en ese periodo. Por el contrario, en enero y febrero el MCI desarrolló bajos valores de potencia efectiva, inferiores a 5000 kW (Tabla 3.1).

El rendimiento efectivo del motogenerador se comportó de forma semejante al mecánico, lo cual es lógico porque este parámetro se determina como el producto de los dos anteriores (los rendimientos indicado y mecánico), según se muestra en la ecuación 2.28. De los resultados obtenidos se infiere que en el motor se aprovecha adecuadamente el calor suministrado con el combustible.

En relación con los rendimientos, resulta útil enfatizar en que se realice correctamente el tratamiento del combustible antes de la alimentación del motor, es decir, que el mantenimiento del filtro se efectúe de acuerdo con el programa. La eficiencia del filtrado del crudo influye directamente en la vida útil del equipo de inyección y, por tanto, en el rendimiento del motor.

3.4.3. Comportamiento de los consumos específicos

Estos parámetros son muy importantes en la evaluación energética de los motores de combustión interna, porque permiten evaluar la economía del motogenerador. Al respecto, el MCI-10 mostró tendencias oscilantes que estuvieron matizadas por las respectivas potencias indicada y efectiva (Figura 3.4). Los valores promedio de los consumos fueron 173,52 y 214,75 g/kW·h.

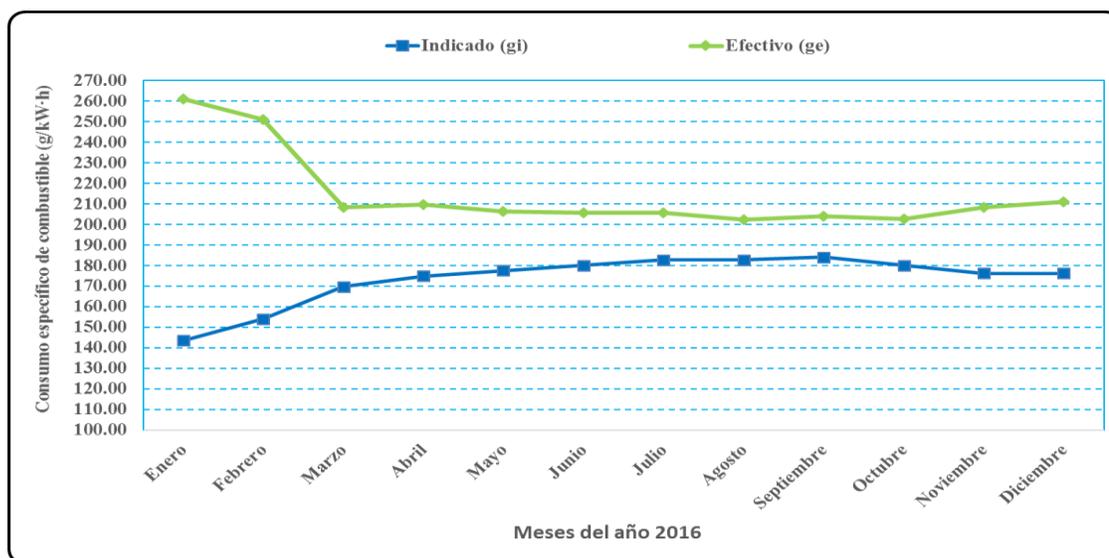


Figura 3.4. Comportamiento de los Consumos Específicos de Combustible en el MCI-10.

En la Figura 3.4 se aprecian incrementos, a partir de junio, en los valores del consumo específico indicado. Estos pueden ser atribuibles al incremento que experimentó el consumo de combustible a pesar de permanecer constante la potencia indicada.

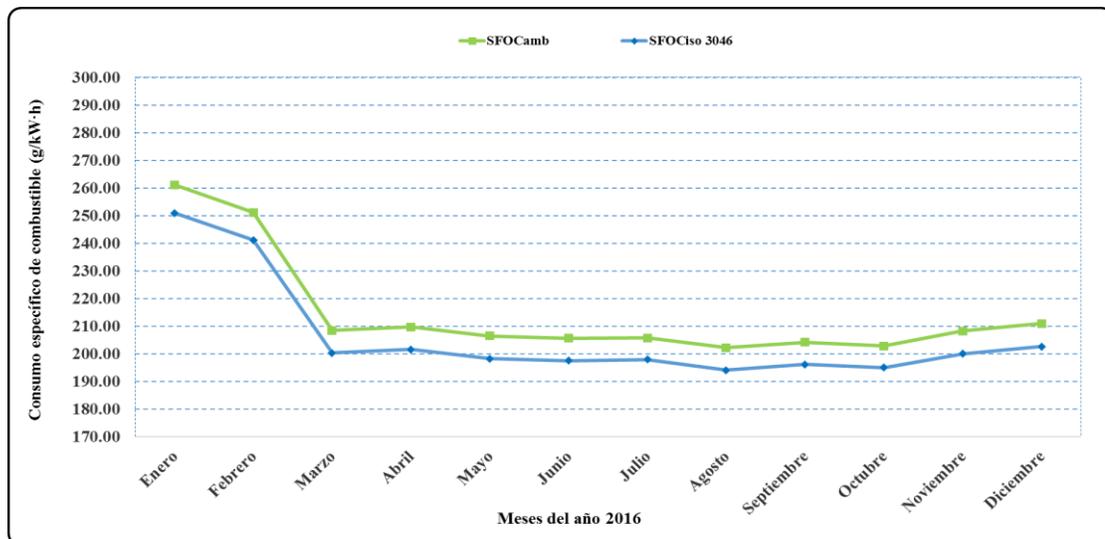


Figura 3.5. Comportamiento del consumo específico de crudo, calculado según la norma ISO 3046.

Nota: los términos SFO_{amb} y $SFO_{iso\ 3046}$ se definen en la página 90 del presente informe).

Al calcular el consumo específico efectivo aplicando la norma ISO 3046 (ver procedimiento en el epígrafe 4.6.1) se observa una adecuada correspondencia entre los valores calculados para las condiciones ambientales existentes en la planta de generación térmica No. 2 (SFO_{amb}) y los estándares preestablecidos en la norma ($SFO_{iso\ 3046}$). Lo anterior se infiere de la Figura 3.5.

3.4.4. Otros parámetros de interés calculados durante la evaluación energética

Además de los parámetros antes analizados y los restantes expuestos en la Tabla 3.1, para evaluar energéticamente al MCI-10, en la investigación se determinaron otras variables importantes. A continuación, se relacionan las mismas con su correspondiente valor promedio y unidad de medida: relación aire/combustible o dosado (0,0714, adimensional); dosado estequiométrico (0,0690, adimensional); dosado relativo (1,0357, adimensional); coeficiente de exceso de aire (0,9655, adimensional) y flujo másico de

aire (18608,33 kg/h). Como se aprecia, la instalación trabaja con defecto de aire, esto explica la combustión incompleta que en ella se produce y la presencia de Monóxido de Carbono (CO) en los gases de escape, cuyo valor promedio asciende a 165,15 ppm.

3.5. Incidencia de los parámetros principales de los motores en los equipos electrógenos

Todos los parámetros antes analizados (los flujos de calor, los rendimientos y los consumos específicos de combustible) tienen incidencia, en mayor o menor medida, en el trabajo de los equipos electrógenos, entendidos estos últimos como el conjunto motor-generador. En la planta de generación térmica No. 2 del B12 de Petroamazonas EP se explotan seis motogeneradores (Tabla 3.6).

Tabla 3.6.

Producción de potencia de los MCI de la planta de generación No. 2.

Año: 2016	Potencia (kW)					
	MCI-09	MCI-10	MCI-11	MCI-12	MCI-13	MCI-14
Enero	4647,82	3362,90	5145,16	5621,24	5083,74	3798,32
Febrero	4421,90	4291,74	5567,09	5351,75	5849,63	4600,52
Marzo	5718,21	5998,58	6190,59	6151,43	5941,51	5922,48
Abril	6040,62	6003,63	5989,17	6082,78	6047,32	5562,57
Mayo	6229,06	6230,51	6002,66	6279,82	6182,63	6073,24
Junio	6345,40	6257,90	6356,11	6338,33	6331,05	6135,94
Julio	6539,34	6493,93	6591,56	6615,24	6452,11	6439,24
Agosto	6546,54	6323,37	6588,55	6559,95	6563,52	6504,27
Septiembre	6531,32	6543,00	6617,01	6534,44	6552,01	6376,14
Octubre	6432,86	6432,68	6474,83	6486,17	6486,52	6308,31
Noviembre	6128,86	6270,78	6279,82	6,242,33	6293,82	6208,13
Diciembre	6051,72	6054,67	6094,18	6108,87	5949,01	6019,31

Como se observa en la Figura 3.6, la producción de potencia promedio mensual de cada motor superó los 5800 kW, y tres de ellos alcanzaron valores superiores a los 6100 kW (los MCI-11; 12 y 13). Sin embargo, el MCI-10 (que es el analizado en este

capítulo) fue el segundo que menos potencia produjo (analizar Tabla 3.6), tanto promedio mensual como total en el año 2016 (5855,31 y 70263,70 kW, respectivamente), solo por delante del MCI-14 (5829,04 y 69948,46 kW).

Este comportamiento permite aseverar que, aunque el desempeño energético del motor en general puede considerarse satisfactorio, en el motogenerador existen reservas energéticas que pueden ser aprovechadas si se implementa un sistema de gestión energética eficiente que permita perfeccionar el sistema de mantenimiento implementado y, por consiguiente, aumentar la disponibilidad (medida en horas de trabajo) del equipo, la cual fue inferior en un 4 % al valor promedio obtenido para la planta de generación No. 2 (analizando los seis motores).

Estas deficiencias antes señaladas al MCI-10, juntos a los argumentos expuestos en el epígrafe 3.2, fueron los que determinaron su selección como caso de estudio para la implementación del procedimiento de evaluación energética.

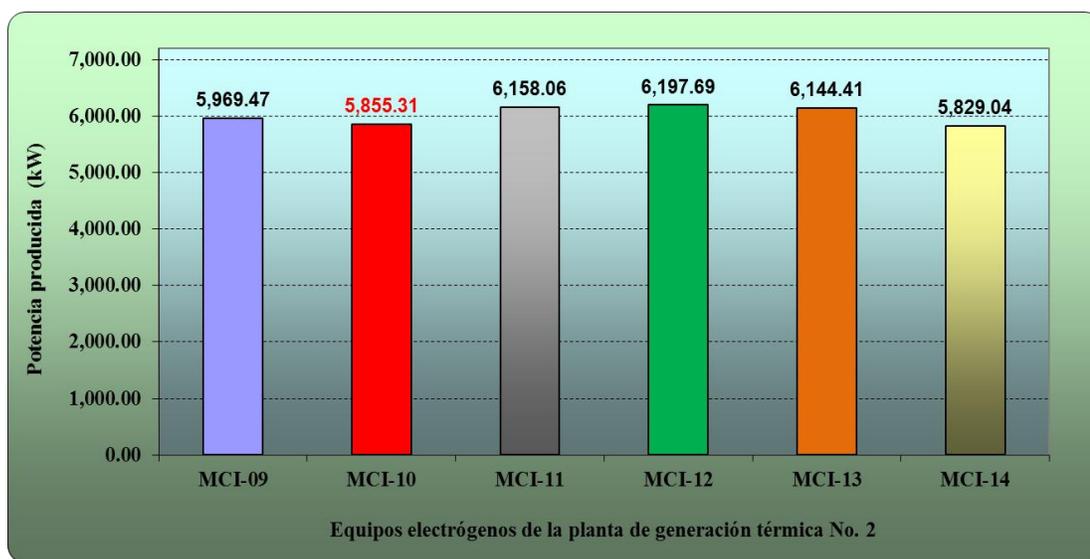


Figura 3.6. Comportamiento de la Producción de Potencia (promedio) en los Equipos Electrónicos.

En ningún caso se puede desvincular el motor de combustión del generador eléctrico, ambas máquinas constituyen un conjunto que conforman el equipo electrógeno. En este sentido, para lograr adecuados rendimientos del conjunto (en la producción de energía eléctrica) se debe prestar especial atención a los parámetros termoenergéticos del

motogenerador. Lo anterior se demuestra en la Figura 3.7, la cual refleja el comportamiento de la generación de energía eléctrica del grupo electrógeno. El mismo está determinado por la producción de potencia del motor de combustión interna (Tabla 3.6 y Figura 3.6).

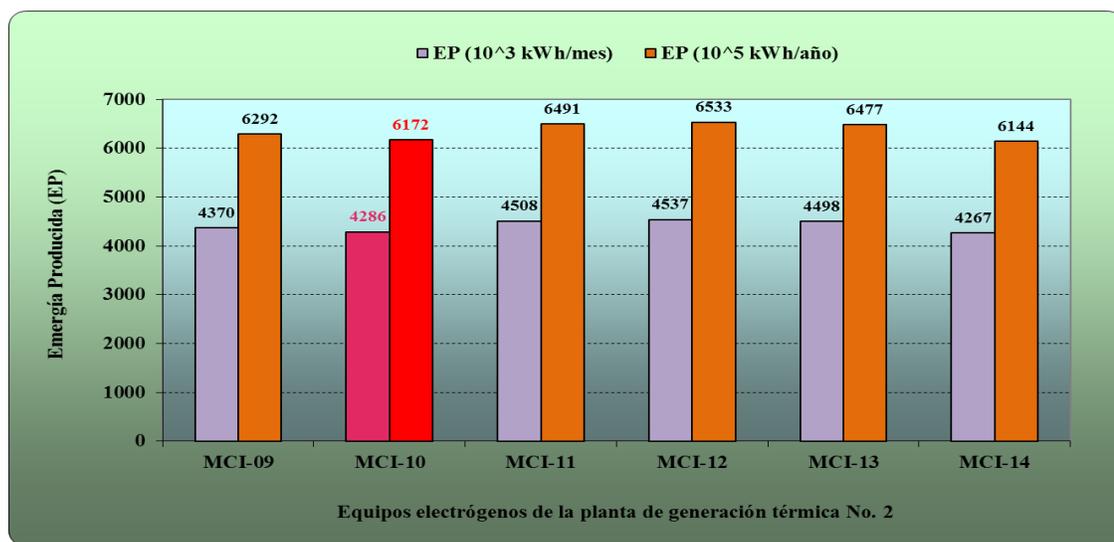


Figura 3.7. Comportamiento de la Producción de Energía en los Equipos Electrógenos.

3.6. Valoración económica asociada al trabajo de los MCI en la planta térmica No. 2

En la Tabla 3.7 y 3.8 se exponen los resultados de la valoración económica asociada al trabajo de los seis motores de combustión interna de la planta de generación térmica No. 2 (durante el año 2016). Se utilizó el valor promedio del precio del kWh, producido con crudo por ser el combustible empleado en esta planta (0,135 USD/kWh). Se destaca que el precio durante el año osciló entre 0,13-0,14 USD/kWh.

Estos datos fueron reportados por el departamento de operaciones de la empresa Petroamazonas EP.

Tabla 3.7.

Gasto económico mensual asociado a la energía producida en la planta No. 2.

Año: 2016	Energía Producida (kWh/mes)						Gasto	
	MCI-09	MCI-10	MCI-11	MCI-12	MCI-13	MCI-14	Total	USD
Enero	3402206	2461645	3766258	4114745	3721295	2780370	20246520	2733280,18
Febrero	3236832	3141551	4075111	3917481	4281933	3367579	22020486	2972765,63
Marzo	4185727	4390963	4531513	4502846	4349182	4335253	26295483	3549890,23
Abril	4421737	4394657	4384072	4452593	4426635	4071798	26151492	3530451,41
Mayo	4559672	4560734	4393944	4596825	4525683	4445614	27082473	3656133,87
Junio	4644830	4580786	4652672	4639657	4634326	4491507	27643779	3731910,12
Año: 2016	Energía Producida (kWh/mes)						Gasto	
	MCI-09	MCI-10	MCI-11	MCI-12	MCI-13	MCI-14	Total	USD
Julio	4786801	4753559	4825021	4842353	4722948	4713525	28644207	3866967,92
Agosto	4792069	4628709	4822822	4801885	4804497	4761122	28611105	3862499,24
Septiembre	4780929	4789475	4843655	4783211	4796071	4667336	28660676	3869191,28
Octubre	4708854	4708718	4739578	4747874	4748133	4617681	28270837	3816563,03
Noviembre	4486323	4590210	4596831	4569388	4607078	4544348	27394177	3698213,95
Diciembre	4429860	4432021	4460937	4471694	4354674	4406137	26555322	3584968,42

Tabla 3.8.

Gasto económico anual asociado a la energía producida en la planta No. 2.

Energía Producida (kWh/año)							Gasto	
MCI-09	MCI-10	MCI-11	MCI-12	MCI-13	MCI-14	Total	USD	
629230064	617196337	649108964	653286619	647669456	614427254	3810918693	514474023,51	
Gasto anual asociado a la energía producida por cada MCI y por la planta No. 2 (USD)								
84946059	83321505	87629710	88193694	87435377	82947679	514474023,51	-	
Cuantía que representa el gasto de cada MCI en el total de la planta de generación No. 2 (%)								
16,51	16,20	17,03	17,14	17,00	16,12	100	-	

El gasto mensual asociado a la producción de energía en la planta de generación térmica No. 2 osciló entre los 2,733 y 3,869 millones de dólares. Los meses en que más dinero tuvo que erogar la planta fueron agosto, septiembre y octubre, en todos ellos el

gasto superó a los 3,8 millones de dólares. Asimismo, el gasto anual en la planta ascendió a los 514,474 millones de dólares (Tabla 3.8).

El impacto de cada equipo electrógeno en el gasto total de la planta se muestra en la tabla anterior, de los resultados obtenidos se infiere que el MCI-10 consumió el 16,20 % del dinero gastado en la producción de energía.

Al valorar los resultados económicos asociados a la producción de energía se aprecia que los MCI 09; 10; 11; 12; 13 y 14 generaron gastos a la empresa en el orden de los 84,94; 83,32; 87,62; 88,19; 87,47 y 82,94 millones de dólares, respectivamente. Estas erogaciones son significativas y determinan los costos de producción de energía eléctrica en la planta, de ahí la importancia que reviste el control de los parámetros del proceso que inciden en el rendimiento de estas instalaciones.

3.7. Afectaciones ambientales asociadas al trabajo de los MCI en la planta térmica No. 2

De acuerdo con la fuente bibliográfica consultada, para la empresa Petroamazonas EP constituye de alta prioridad, la conciencia ambiental en el desarrollo de todas sus actividades, es así que promueve e implementa dicho precepto a través de su política, misión, visión y valores en su accionar. Desde el inicio de sus operaciones y hasta la actualidad se ha enfocado a priorizar la conservación del ambiente, delineando directrices en su gestión, en base a trabajos técnicos y operativos que procuran armonizar con los ecosistemas circundantes a sus actividades. El cuidado de los recursos naturales y la prevención, disminución y mitigación de los potenciales impactos que la actividad de extracción y procesamiento de petróleo crudo pueda generar, son un pilar fundamental y de importancia para la empresa, ya que consiste el principal legado y sinónimo de sustentabilidad para el presente del país y las generaciones venideras (Petroamazonas EP: Memoria de Sostenibilidad, 2013).

A pesar de la positiva gestión ambiental que realiza la empresa, los motores de combustión interna siempre provocarán afectaciones al medio ambiente, por trabajar a partir de la combustión de un combustible fósil, en este caso el crudo. Es por ello que en este epígrafe se resumen los resultados obtenidos por la empresa Petroamazonas EP en

las emisiones de gases contaminantes en el MCI-10. Los detalles de las mediciones de emisiones se exponen en la Tabla 3.9 (ABRUS, 2016a, b, c y d).

Tabla 3.9.

Detalles relativos a la medición de emisiones en los MCI.

Parámetros medidos	Instrumentos usados	Principio de determinación
Dioxígeno y Dióxido de Carbono (O ₂ y CO ₂)	Sensores Electroquímicos	Extracción de un volumen de gas y análisis electroquímico
Monóxido de Carbono (CO)		
Dióxido de Nitrógeno y Monóxido de Nitrógeno (NO ₂ y NO)		
Dióxido de Azufre (SO ₂)		

Fuente: ABRUS, 2016a.

De acuerdo a los resultados obtenidos en las mediciones de las emisiones, se aprecia que las concentraciones promedio de CO, NO_x y SO₂ emitidas por los motores de combustión interna de la planta de generación No. 2, se encuentran dentro de los límites máximos permitidos, según el Acuerdo Ministerial No. 091.

Tabla 3.10.

Resultados de las emisiones en los MCI de la planta de generación No.2.

Parámetros (mg/Nm ³)	*Emisiones de gases en los MCI de la planta de generación No. 2							Periodo
	MCI-09	MCI-10	MCI-11	MCI-12	MCI-13	MCI-14	Promedio	
CO	138,2	149,8	97,2	95,7	83,6	138,7	117,20	Primer Trimestre
NO _x	1038,6	1157,3	1234,4	1202,6	1258,9	1166,9	1176,45	
SO ₂	992,3	1018,5	909,3	892,6	1053,8	934,7	966,87	
CO	122,4	159,1	63,5	88,4	109,9	64,1	101,23	Segundo Trimestre
NO _x	1052,7	1093,4	1110,0	1212,6	1110,2	990,5	1094,90	
SO ₂	946,1	920,5	1002,9	985,2	1063,4	1007,7	987,63	
CO	116,6	-	115,6	112,7	123,3	113,8	116,40	Tercer Trimestre
NO _x	983,7	-	959,9	904,7	1010,0	952,4	962,14	
SO ₂	845,2	-	1011,5	993,2	1394,7	1304,3	1109,78	
CO	149,6	142,6	121,8	148,7	106,0	139,8	134,75	Cuarto Trimestre
NO _x	1248,9	1147,3	1248,6	1254,4	1151,5	1172,0	1203,78	
SO ₂	964,7	949,3	980,0	1070,4	1090,0	951,9	1001,05	

Límites máximos permitidos en el Acuerdo Ministerial No. 091: CO = 150; SO₂ = 2000 y SO₂ = 1500 (todos expresadas en mg/Nm³)

Fuentes: ABRUS, 2016a, b, c y d.

* Expresado el valor al 15 % de O₂, en condiciones normales y en base seca.

Adicionalmente, el MCI-10 se realizó las mediciones de emisiones que se exponen en la Tabla 3.11. En general, se cumple los límites establecidos en el Acuerdo Ministerial No. 091. No obstante, se considera importante exponer algunas características de los principales agentes contaminantes.

Tabla 3.11.

Resultados de las emisiones de gases en el MCI-10 de la planta de generación No. 2.

***Emisiones de gases en el MCI-10 de la planta de generación No. 2**

Equipo ↓	Primer Trimestre		Segundo Trimestre		Tercer Trimestre		Cuarto Trimestre	
	O ₂	CO ₂	O ₂	CO ₂	O ₂	CO ₂	O ₂	CO ₂
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
MCI-10	12,175	6,170	12,763	6,220	-	-	13,387	5,718

Fuentes: ABRUS, 2016a, b, c y d.

3.7.1. Agentes contaminantes del medio ambiente en los MCI

En los MCI constituyen contaminantes los gases producto de la combustión, y en menor medida el ruido. Los principales elementos nocivos que circulan con los gases de la combustión son: los óxidos de azufre, el monóxido de carbono y los óxidos nitrosos. Sus particularidades y los efectos nocivos más importantes que estos provocan se describen a continuación (Vega, 2013).

3.7.1.1. Óxidos de azufre

Los óxidos de azufre que se forman durante el proceso de quemado de un combustible son el SO₂ y, en menor medida, el SO₃. Sus cantidades dependen del contenido de azufre en el combustible. Los carbones, en términos generales, son los más contaminantes y en orden descendente, le siguen el aceite combustible pesado (fuel-oil), el aceite combustible ligero (gas oil) y el gas. Los efectos nocivos más importantes de estos

óxidos son: las afectaciones en las vías respiratorias de los seres humanos y animales, así como la formación de lluvias ácidas de graves consecuencias ecológicas.

3.7.1.2. Monóxido de carbono

El monóxido de carbono es el resultado de una combustión incompleta de los reactantes de los combustibles orgánicos, por ello la magnitud que se emite a la atmósfera depende esencialmente de la calidad con que se efectúe el proceso de combustión. Los efectos nocivos más importantes del CO son: las afectaciones a la capacidad respiratoria de personas y animales, y la reacción de stress psicológico y alteración de las habilidades motoras.

3.7.1.3. Óxidos nitrosos

Los óxidos nitrosos (NO_x) son el resultado de la combustión del nitrógeno del combustible y el aire. Este término incluye un alto número de especies gaseosas, pero las más significativas, según las cantidades emitidas son: el dióxido de nitrógeno (NO_2) y el óxido nitroso (NO). De acuerdo al nivel de nocividad resulta más peligroso el NO_2 . La cantidad de NO_x formada, depende de la cuantía de oxígeno y nitrógeno disponibles durante la combustión, la temperatura, el nivel de mezclado que se alcance y el tiempo de la reacción química. Los efectos perjudiciales más relevantes de los NO_x son:

- ✓ Creación de desórdenes respiratorios en seres humanos y animales.
- ✓ Reducción de la visibilidad por adsorción del espectro visible para los humanos.
- ✓ Afectaciones a las plantas por lluvias ácidas.
- ✓ Aceleración de la corrosión y la degradación material.
- ✓ Contribución a la formación del *smog* sobre las ciudades.
- ✓ Se le asocia con la formación de ozono en las zonas bajas de la atmósfera, el cual resulta un tóxico para las personas y se le atribuyen propiedades cancerígenas.

Los NO_x formados por la oxidación, a altas temperaturas, del nitrógeno del aire, reciben el nombre de NO_x térmicos: La temperatura a partir de la cual se intensifica la

oxidación del nitrógeno es de 1200 °C. Los NO_x formados a través de reacciones químicas del nitrógeno presente en el combustible, durante el proceso de quemado de este, reciben el nombre de NO_x del combustible. En general, la formación de NO_x se ve favorecida por las medidas adoptadas para favorecer la combustión, por ello, su control conlleva un compromiso entre los factores que incrementan la eficiencia de la combustión y los que reducen la formación de NO_x.

3.7.1.3. Regulaciones sobre emisiones contaminantes

Las regulaciones sobre las emisiones contaminantes son distintas en cada país, incluso dentro de un país hay diferentes por regiones y sectores. Muchos países tienen regulaciones mínimas y otros aún no, pero para el proceso investigado los límites máximos permitidos están regulados en el Acuerdo Ministerial No. 091, de Ecuador. El grado de restricción que se impone mediante las regulaciones toma en cuenta varios factores, entre los que pueden mencionar: el deterioro ambiental existente, las condiciones poblacionales, el hecho de que se trate de una instalación ya existente o que sea nueva, el tipo de combustible, el modo de combustión y los compromisos internacionales del país.

3.7.1.4. Efecto del ruido sobre la salud de los seres humanos

De acuerdo con Vinardell (2011), entre los impactos negativos del ruido se encuentran los cambios y pérdida de la audición, interferencia de la comunicación oral, molestias y disminución de la capacidad de trabajo. La exposición prolongada a altos niveles de ruido puede provocar la pérdida total de la audición. Otras alteraciones del oído producto del ruido son el tapamiento del canal auditivo y la ruptura de la membrana timpánica. El ruido también produce en el sistema neuro-vegetativo una serie de modificaciones funcionales que son reacciones de defensa del organismo frente a una agresión externa, por ejemplo: la elevación de la presión arterial, aceleración del ritmo cardiaco, tensión muscular, descarga de hormonas en sangre, entre otras. Esto ocurre, fundamentalmente, cuando el ruido es muy intenso, de carácter impulsivo y el que escucha no está preparado para ello. Los niveles de ruido altos, están considerados como factores de riesgo para la vida de los seres humanos porque casi siempre desencadenan en una enfermedad cardiovascular.

En relación con las emisiones de ruido, Petroamazonas EP cumple con las normas vigentes. Además, cuenta con plataformas sin ruido ni emisiones, senderos ecológicos y optimiza las áreas del bosque con un mínimo impacto ambiental (Petroamazonas EP: Memoria de Sostenibilidad, 2013).

3.8. Conclusiones del capítulo 3

- ✦ El análisis de los resultados obtenidos en la evaluación energética del motor de combustión interna Wärtsilä W18V32 (ZAN 110 o MCI-10) evidenció que el motogenerador tiene un desempeño termoenergético favorable. El motor transformó en potencia efectiva el 41,13 % del calor disponible en el combustible, en los gases de escape se perdió el 16,88 %, al fluido refrigerante se transfirió el 9,67 %, y los calores restantes representaron el 32,32 %. Estos comportamientos son congruentes con los obtenidos en investigaciones precedentes.
- ✦ La producción de energía en la planta térmica de generación, mediante la explotación de los motores de combustión interna 09; 10; 11; 12; 13 y 14, generó gastos anuales a la empresa Petroamazonas EP ascendentes a los 84,94; 83,32; 87,62; 88,19; 87,47 y 82,94 millones de dólares, respectivamente. Estos motogeneradores, al combustionar el crudo, emitieron gases contaminantes al medio ambiente, siendo los más nocivos los óxidos de azufre y de nitrógeno, así como el monóxido de carbono. Sin embargo, las emisiones fueron inferiores a los límites máximos permitidos en las regulaciones vigentes en el Ecuador.

CAPÍTULO 4: PROPUESTA DE UN PROCEDIMIENTO PARA LA OPERACIÓN EFICIENTE DE LOS MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA WÄRTSILÄ W18V32

4.1. Introducción al capítulo

En el capítulo precedente se desarrolló la evaluación energética de los parámetros fundamentales de los motogeneradores Wärtsilä W18V32 y se determinó la incidencia que estos tienen en la operación de los equipos eléctricos explotados por la empresa Petroamazonas EP, para la generación eléctrica en el campo Edén Yuturi del Bloque 12. Al valorar integralmente los resultados de la investigación resulta evidente que en la planta de generación térmica No. 2 no se aplica una adecuada estrategia de gestión energética, es por ello que se requieren de propuestas que contribuyan a perfeccionar el desempeño integral de los motores de combustión interna, por ser estos equipos los más importantes de la central termoenergética.

El **objetivo** del presente capítulo es: establecer un procedimiento para la operación eficiente de los motores de combustión interna Wärtsilä W18V32, basado en la aplicación de herramientas de la TGTEE y la norma ISO 50001.

4.2. Título de la propuesta

Procedimiento para la operación eficiente de los motores de combustión interna Wärtsilä W18V32 basado en la aplicación del protocolo de prueba basado en la norma ISO 15550, la evaluación energética y las herramientas de la TGTEE y la norma ISO 50001.

4.3. Justificación de la propuesta

Las industrias del sector petrolero no deben prescindir de la eficiencia energética y la competitividad empresarial. De acuerdo con Borroto y Monteagudo (2006), la eficiencia energética (eficiencia en la producción, distribución y uso de la energía necesaria para garantizar calidad total), es parte esencial de los problemas que afectan la competitividad de las empresas o instituciones. La misma implica lograr un nivel de producción o servicios, con los requisitos establecidos por el cliente, con el menor consumo y gasto energético posible, y la menor contaminación ambiental por este concepto.

La energía cada día se encarece más, por ello en muchos casos uno de las principales partidas del costo total es el costo energético, donde se incluyen los componentes relativos a la producción, distribución y uso de las diferentes formas de energía y el agua. Los aspectos básicos que determinan la competitividad de una empresa o institución son la calidad y el precio de sus productos o servicios. La posición en el mercado y la estrategia de cambio de posición vienen determinadas por la relación calidad - precio con respecto a otras empresas de la competencia.

El propósito estratégico de todo empresario es ubicarse en la punta de la competencia, logrando mayor calidad y menor precio, o en el caso de precios fijados por un mercado globalizado, mantener una alta calidad con los menores costos posibles, para aumentar las utilidades. Un programa de aumento de la eficiencia energética reduce los costos, permite disminuir el precio o aumentar las utilidades, asegurando la calidad y mejorando la competitividad de la empresa en el mercado.

El impacto de los costos energéticos sobre los costos totales de producción depende del sector y tipo de empresa o entidad. Pero aún en aquellas empresas donde la energía no representa una de las principales partidas, es importante la administración eficiente de la energía.

El ahorro de energía, si bien no representa una fuente de energía en sí, se acostumbra a considerarla como tal, ya que ofrece la posibilidad de satisfacer más servicios energéticos, lo que es equivalente a disponer de más energía. El incremento de la eficiencia energética tiene un beneficio ambiental inmediato y directo, ya que implica una reducción en el uso de recursos naturales y en la emisión de contaminantes, incluido el CO₂. Sin lugar a dudas, la energía más limpia es la energía ahorrada.

El incremento de la eficiencia energética se logra mediante las acciones tomadas por productores o consumidores que reducen el uso de energía por unidad de producto o servicio, sin afectar la calidad del mismo. Para evaluar la eficiencia energética se utilizan tres tipos de índices: de consumo [Energía consumida/Producción, Servicios prestados y Área construida]; de eficiencia [Energía teórica/Energía real y Energía producida/Energía consumida] y; Económico-Energéticos [Gastos Energéticos/Gastos Totales, Ingresos (ventas) y Energía total consumida/Valor de la producción total realizada (Intensidad

Energética)]. Un monitoreo y control energético efectivo en una empresa o entidad de servicio, requiere de la utilización de un conjunto de indicadores de los tres tipos, y no solo a nivel de entidad, sino estratificados hasta el nivel de las áreas y equipos mayores consumidores (“los denominados Puestos Claves”), como los MCI en las centrales térmicas.

Entre los resultados más significativos de programas de ahorro de la energía en América Latina y el Caribe se encuentra el de Perú que logró detener el crecimiento de la demanda de electricidad a pesar del incremento del número de consumidores, mejorando los hábitos de consumo y la cultura energética en el sector residencial e industrial. También, reportan resultados positivos en la gestión energética México, Colombia, Brasil y Cuba. Sin embargo, Ecuador debe continuar mejorando y en ello las empresas petroleras, como Petroamazonas EP, juegan un rol importante. Los aspectos anteriores le confieren utilidad práctica a la propuesta que se desarrolla en la presente investigación.

4.4. Objetivo de la propuesta

Generar un procedimiento para la operación eficiente de los motores de combustión Wärtsilä W18V32, basado en la implementación de herramientas de la TGTEE y la norma ISO 50001.

4.5. Estructura de la propuesta

La propuesta establecida en la investigación, consistente en el procedimiento para la operación eficiente de los motores Wärtsilä W18V32, se estructura en los pasos lógicos siguientes:

- 1. Determinar, mediante el protocolo de pruebas correspondiente, el consumo específico de combustible** y compararlo con los estándares establecidos por el fabricante (la compañía Wärtsilä), según la norma ISO 15550 (Ver Anexo 2). En caso de estar en el intervalo recomendado, se sugiere el seguimiento y control estricto de los parámetros de operación de los equipos y el cumplimiento de los sistemas de mantenimiento vigentes en el periodo en que se realizó la prueba. En caso contrario, o sea, si el consumo

específico real es mucho mayor que las recomendaciones de la norma ISO 15550, se propone la siguiente acción complementaria:

2. **Reevaluar energéticamente a los motores de combustión interna** de la planta de generación térmica y calcular sus principales parámetros de operación (según el método de cálculo propuesto en el capítulo 2), a fin de encontrar anomalías y las causas que la originan. Luego, se sugiere analizar estas últimas para determinar si están relacionadas con la implementación de inadecuados sistemas de mantenimiento y/o la explotación de tecnologías y equipos ineficientes; o con la aplicación de un deficiente sistema integral de gestión energética y la proliferación de inadecuadas prácticas de consumo de portadores energéticos (caso muy frecuente en el sector productivo y de los servicios, sobre todo en países en vía de desarrollo, como lo es Ecuador). Si existiera la primera condicionante, entonces se recomienda:
 - Perfeccionar y/o cambiar lo que corresponda: el sistema de mantenimiento empleado y/o los equipos y tecnologías energéticamente ineficientes, esto último aplica si la empresa tiene solvencia económica proyectada para este propósito.
3. Finalmente se sugiere, que como política de la empresa Petroamazonas EP, se **implemente un sistema integral de gestión energética**. El mismo debe estar sustentado en la aplicación consecuente de herramientas de la TGTEE y la norma ISO 50001. Estos dos procedimientos son útiles para este propósito.

4.5.1. Particularidades de la TGTEE

Actualmente, el problema de explotar el recurso eficiencia energética se ha abordado en las empresas de una forma muy limitada, fundamentalmente mediante la realización de diagnósticos energéticos para detectar las fuentes y niveles de pérdidas, y posteriormente definir medidas o proyectos de ahorro o conservación energética. Esta vía, además de obviar parte de las causas que provocan baja eficiencia energética en las empresas, generalmente tiene baja efectividad por realizarse muchas veces sin la integralidad, los procedimientos y el equipamiento requerido, por limitaciones financieras para aplicar los proyectos; pero sobre todo, por no contar la empresa con la cultura ni las

capacidades técnico-administrativas necesarias para realizar el seguimiento y control requerido y lograr un adecuado nivel de consolidación de las medidas aplicadas (Labañino, 2015).

La entidad que no comprenda esto verá limitadas sus posibilidades de crecimiento y desarrollo con una afectación sensible de su nivel de competencia y calidad de los servicios que presta; quedará rezagada respecto a las que preparen sus recursos humanos y creen las capacidades permanentes para explotar este recurso, de magnitud no despreciable, en sus propias instalaciones.

La elevación de la eficiencia energética puede alcanzarse por dos vías fundamentales, no excluyentes entre sí: mejor gestión energética y buenas prácticas de consumo; explotación de tecnologías y equipos eficientes. Cualquiera de las dos reduce el consumo específico, pero la combinación de ambas es la que posibilita alcanzar el punto óptimo. La primera tiene un menor costo, pero el potencial de ahorro es menor y los resultados son más difíciles de conseguir y mantener, puesto que entrañan cambios en hábitos de consumo y en métodos de gestión empresarial. La segunda requiere de inversiones, pero el potencial de ahorro es más alto y asegura mayor permanencia en los mismos.

El alto nivel competitivo a que están sometidas las empresas desde los años 90 les impone cambios en sus sistemas de administración. No es suficiente dirigir desde un núcleo generador de soluciones a los problemas, a través de medidas que compulsen a los hombres y dediquen los recursos a lo que se ha considerado fundamental; se requiere que exista una estrategia, un sistema entendido por todos y con la capacidad para llevarlo a cabo, que garantice la estabilidad de cada resultado en consonancia con la visión que se ha propuesto la empresa.

Actualmente la empresa Petroamazonas EP se enfrenta este problema, al no contar con un sistema de gestión energética suficientemente integral, mediante la adopción de medidas aisladas que no garantizan el mejoramiento continuo de la eficiencia económica que debe lograr la empresa. Los sistemas de planeación y control de la administración de energía que se aplican hoy, en la mayor parte de las empresas en Ecuador, se han retrasado respecto a los métodos de planeación y control económico que el perfeccionamiento de la economía ha exigido.

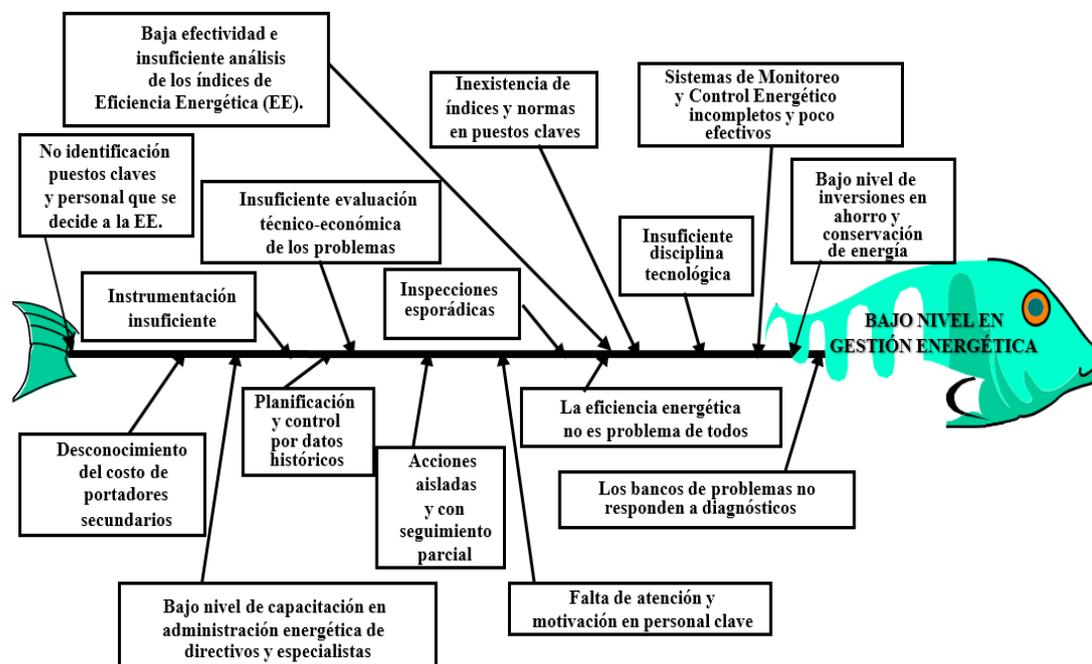


Figura 4.1. Causas del Bajo Nivel en Gestión Energética Existente En la Planta de Generación Eléctrica No. 2 de la Empresa Petroamazonas EP.

Fuente: Borroto y Monteagudo, 2006 (adaptado por la autora a la empresa Petroamazonas EP).

En resumen, los estudios realizados y las investigaciones de campo han puesto de manifiesto el bajo nivel en gestión energética que como promedio existe en las empresas ecuatorianas (incluyendo las del sector petrolero y particularmente la Petroamazonas EP), así como las importantes áreas de oportunidad que existen para reducir los costos energéticos mediante la creación en las empresas de las capacidades técnico organizativas para administrar eficientemente la energía. En la Figura 4.1 se presentan los aspectos principales que caracterizan a las insuficiencias en materia de gestión energética en la planta de generación eléctrica No. 2 de la empresa Petroamazonas EP.

Para lograr la eficiencia energética de forma sistemática es necesaria la aplicación apropiada de un conjunto de conocimientos y métodos que garanticen esta práctica. Ellos deben ser aplicados a los medios de trabajo, los recursos humanos, los procesos, la organización del trabajo, los métodos de dirección, control y planificación. A tal efecto, se ha desarrollado la TGTEE para la gestión energética en las empresas, que sintetiza la

experiencia, procedimientos y herramientas obtenidas en la labor por elevar la eficiencia y reducir los costos energéticos en las mismas.

4.5.1.1. Definición y objetivo de la TGTEE

Esta consiste en un paquete de procedimientos, herramientas técnico-organizativas y software especializado, que aplicado de forma continua y con la filosofía de la gestión total de la calidad, permite establecer nuevos hábitos de dirección, control, diagnóstico y uso de la energía, dirigidos al aprovechamiento de todas las oportunidades de ahorro, conservación y reducción de los costos energéticos en una empresa (Figura 4.2). Su objetivo no sólo es diagnosticar y dejar un plan de medidas, sino elevar las capacidades técnico-organizativas de la empresa, de forma tal que esta sea capaz de desarrollar un proceso de mejora continua de la eficiencia energética (Rey, 2014).

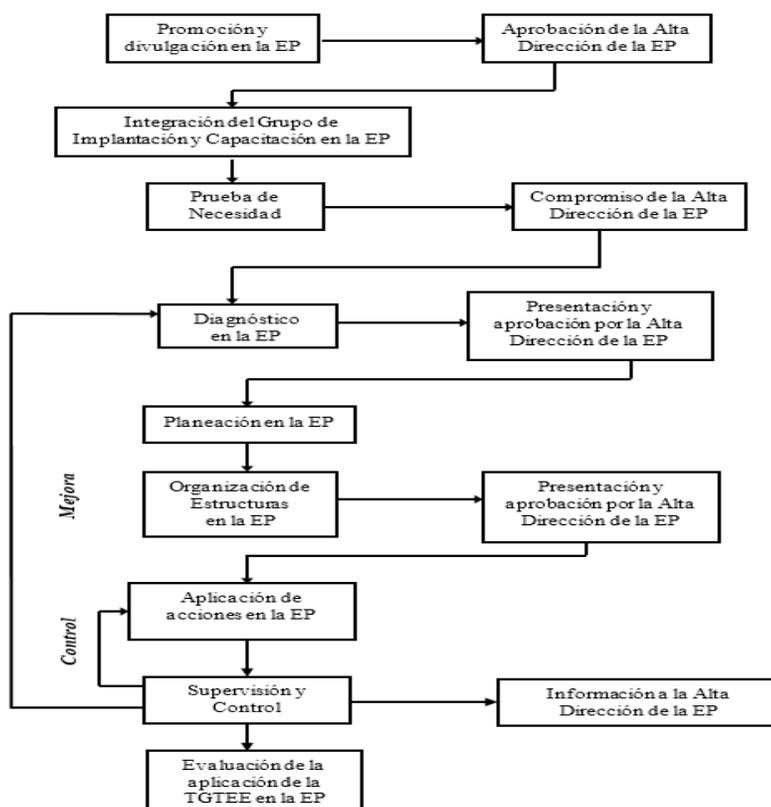


Figura 4.2. Algoritmo para la Aplicación de la TGTEE en la Empresa Pretoamazonas EP.

Fuente: Borroto y Monteagudo, 2006 (adaptado por la autora a la empresa Petroamazonas EP).

La TGTEE incorpora procedimientos y herramientas innovadoras en el campo de la gestión energética. Es particularmente novedoso el sistema de control energético (los procedimientos y herramientas empleados para organizarlo), que incorpora todos los elementos necesarios para que verdaderamente exista control de la eficiencia energética.

Su implantación se realiza mediante un ciclo de capacitación, prueba de la necesidad, diagnóstico energético, estudio socioambiental, diseño del plan, organización de los recursos humanos, aplicación de acciones y medidas, supervisión, control, consolidación y evaluación, en una estrecha coordinación con la dirección de la empresa.

4.5.1.2. Sistema de monitoreo y control energético

El proceso de control se puede realizar de diferentes formas. En los sistemas de control energético es recomendable utilizar el método de control selectivo. La selección de las áreas y equipos se realiza sobre la base de la estructura de consumo y de pérdidas energéticas de la empresa. Se cubre el 20 % de las áreas o equipos que provocan el 80 % del consumo de energía (“Puestos Claves”). Este método incluye el control por excepción, o sea, dentro de estas áreas o equipos se priorizan aquellas que tienen tendencia a las mayores desviaciones.

El proceso de control general incluye también una etapa de mejoramiento del proceso, cuando la acción sobre las variables de control no es suficiente para corregir las constantes variaciones que en este se presentan (Figura 4.3). Esta etapa consiste en una revisión periódica de procedimientos y evaluación técnico-económica de posibilidades de inversión que producen, sin duda, un cambio en los estándares y en los resultados del control frecuente.

La TGTEE ha sido generalizada en empresas de diferentes países, donde se ha demostrado su efectividad para crear en las empresas capacidades permanentes para la administración eficiente de la energía. Su aplicación ha generado significativos impactos económicos, sociales y ambientales, y ha contribuido a la creación de una cultura energético-ambiental. Sin embargo, en Ecuador la misma no ha sido suficientemente implementada, incluyendo a la empresa Pretroamazonas EP.

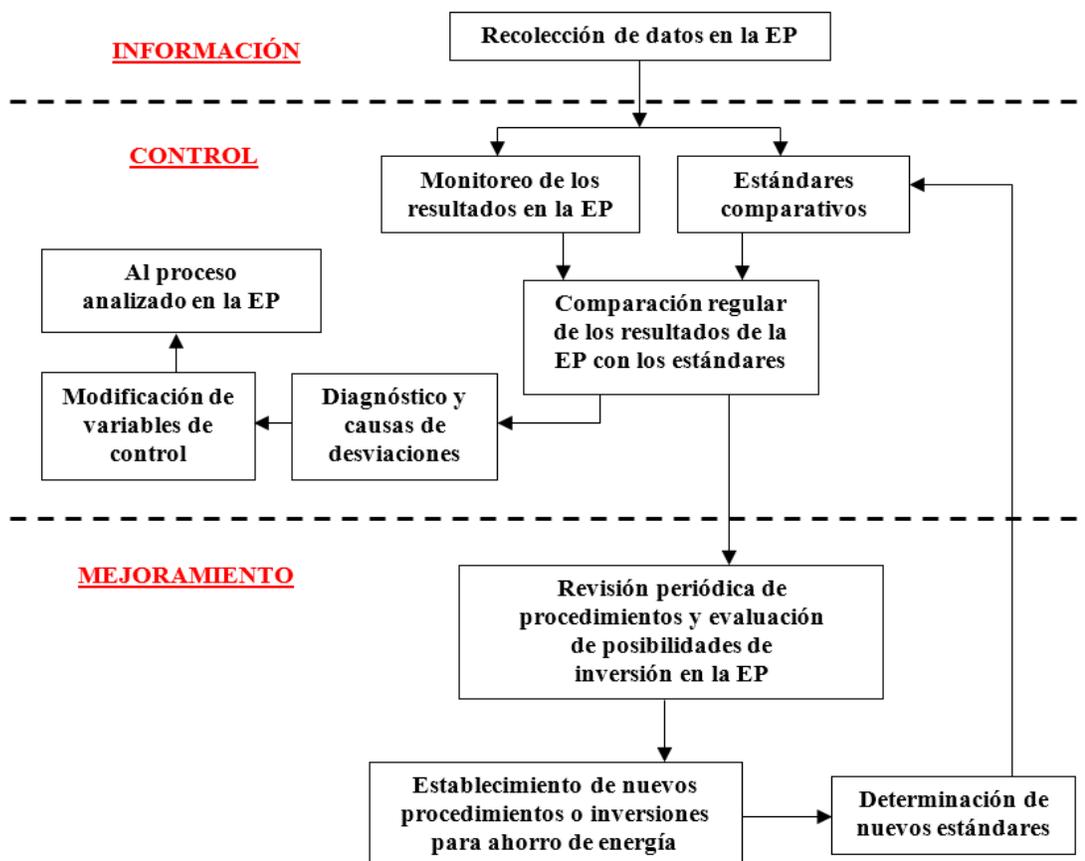


Figura 4.3. Esquema General del Sistema de Monitoreo y Control Energético que se Recomienda Aplicar en la Empresa Pretoamazonas EP.

Fuente: Borroto y Monteagudo, 2006 (adaptado por la autora a la empresa Petroamazonas EP).

4.5.1.3. Procedimientos y herramientas que incorpora la TGTEE

La TGTEE incorpora un conjunto de procedimientos y herramientas innovadoras en el campo de la gestión energética, ellas son:

- ✓ Diagrama de Pareto.
- ✓ Diagrama energético – productivo.
- ✓ Estratificación
- ✓ Gráficos de control.
- ✓ Gráfico de consumo y producción en el tiempo.
- ✓ Diagramas de dispersión, correlación, y de consumo – producción.

- ✓ Diagrama del índice de consumo - producción.
- ✓ Gráfico de tendencia o de sumas acumulativas.

En la presente investigación se implementaron las herramientas siguientes: diagrama de Pareto, estratificación, gráfico de consumo y producción en el tiempo; y diagrama del índice de consumo - producción. Las restantes no pudieron ser aplicadas porque para ello se requiere de información específica de la producción que, en la empresa Petroamazonas EP, no se dispone o es limitada y por tanto la autora no tuvo acceso a la misma. En la literatura se detallan las particularidades de los procedimientos y herramientas que incorpora la TGTEE (Borroto y Monteagudo, 2006). Por tales razones, solo se describen brevemente las empleadas en esta investigación (ver Anexo 3).

4.5.2. Particularidades de la norma ISO 50001

El propósito de esta norma internacional es facilitar a las organizaciones establecer los sistemas y procesos necesarios para mejorar su desempeño energético, incluyendo la eficiencia energética y el uso y el consumo de la energía. La implementación de esta norma está destinada a conducir a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y de otros impactos ambientales relacionados, así como de los costes de la energía a través de una gestión sistemática de la energía. La misma es aplicable a organizaciones de todo tipo y tamaño, independientemente de sus condiciones geográficas, culturales o sociales. Su implementación exitosa depende del compromiso de todos los niveles y funciones de la organización y, especialmente, de la alta dirección (ISO 50001, 2011).

La norma establece los requisitos de un sistema de gestión de la energía (SGEn) a partir del cual la organización puede desarrollar e implementar una política energética y establecer objetivos, metas, y planes de acción que tengan en cuenta los requisitos legales y la información relacionada con el uso significativo de la energía. Un SGEn permite a la organización alcanzar los compromisos derivados de su política, tomar acciones, según sea necesario, para mejorar su desempeño energético y demostrar la conformidad del sistema con los requisitos de esta norma internacional.

La norma ISO 50001 se basa en el ciclo de mejora continua “Planificar – Hacer – Verificar – Actuar (PHVA)” e incorpora la gestión de la energía a las prácticas habituales de la organización tal como se ilustra en la Figura 3 en el Anexo 4.

En el contexto de la gestión de la energía, el enfoque PHVA puede resumirse de la manera siguiente (ISO 50001, 2011):

Planificar: llevar a cabo la revisión energética y establecer la línea de base, los indicadores de desempeño energético (IDEn), los objetivos, las metas y los planes de acción necesarios para lograr los resultados que mejorarán el desempeño energético de acuerdo con la política energética de la organización.

Hacer: implementar los planes de acción de gestión de la energía.

Verificar: realizar el seguimiento y la medición de los procesos y de las características clave de las operaciones que determinan el desempeño energético en relación a las políticas y objetivos energéticos e informar sobre los resultados.

Actuar: tomar acciones para mejorar en forma continua el desempeño energético y el SGen.

Aunque se pueden aplicar diversas herramientas (Borroto, 2013), en este trabajo se establece el consumo de combustible no asociado a la producción, el índice de consumo y la línea base.

4.6. Desarrollo de la propuesta

Cualquiera sean las circunstancias, se deben aplicar progresivamente los pasos definidos en la estructura (ver epígrafe 4.5). La aplicación de la TGTEE y la norma ISO 50001 debe asumirse como una filosofía de trabajo y para ello deben crearse las condiciones necesarias en la empresa Petroamazonas EP, en cuanto a recursos financieros y humanos, así como la presencia de personal especializado en gestión energética y la concientización de todos los obreros de la empresa.

4.6.1. Determinación del consumo específico de crudo de los MCI

Este procedimiento se debe realizar siguiendo el protocolo que establece la norma ISO 15550, la cual es empleada por la Compañía Wärtsilä para el análisis de los motores

W18V32 (ver Anexo 2). Además, para demostrar la veracidad del método empleado por la Compañía Wärtsilä, se empleó la metodología propuesta por Vega (2013), basada en la norma ISO 3046. La misma considera las condiciones de garantía ofrecidas por el vendedor (según la norma ISO 3046) y las que se obtienen durante la prueba experimental, según las ecuaciones 4.1-4.4.

$$SFOC_{iso3046} = \frac{SFOC_{amb}}{dSFOC_{iso}} \quad (4.1)$$

$$SFOC_{amb} = \frac{(V_{fo} \cdot f_{cv1} - V_{dfo} \cdot f_{cv2}) \cdot \rho_{comb(15^\circ C)}}{Ne} = \frac{V_t \cdot \rho_{Comb(15^\circ C)}}{Ne} = \frac{G_t}{Ne} \quad (4.2)$$

Cuando en la instalación no se conoce algunos de los parámetros en el término $(V_{fo} \cdot f_{cv1} - V_{dfo} \cdot f_{cv2})$ de la expresión 4.2, entonces se emplea como método alternativo la ecuación 4.3 (así se hizo en los motores Wärtsilä W18V32). Esta inferencia fue realizada por la autora del presente trabajo.

$$V_t = V_{fo} \cdot f_{cv1} - V_{dfo} \cdot f_{cv2} = \frac{G_t}{\rho_{comb(15^\circ C)}} \quad (4.3)$$

$$dSFOC_{iso3046} = \frac{100 + (T_{amb} - 25) \cdot 0,05 - (P_{amb} - 1000) \cdot 0,007 + (T_{aef} - 25) \cdot 0,07 - \left(\frac{Q_t^i - 42700}{427} \right)}{100} \quad (4.4)$$

Donde:

$SFOC_{iso3046}$: consumo específico corregido según las condiciones de garantía; g/kW·h.

$SFOC_{amb}$: consumo específico calculado según parámetros medidos durante las pruebas; g/kW·h.

$dSFOC_{iso3046}$: factor de corrección por cambio de las condiciones de garantía; adimensional.

V_{fo} : flujo volumétrico de HFO integrado en el metro a la temperatura de trabajo; m³/h.

V_{dfo} : flujo volumétrico de drenaje de HFO medido a la temperatura ambiente; m³/h.

f_{cv1} : factor de corrección del volumen medido con el flujómetro (en la entrada del motor) de la temperatura de medición con referencia a 15 °C; adimensional.

f_{cv2} : factor de corrección del volumen medido de drenaje de la temperatura de medición con referencia a 15 °C; adimensional.

$\rho_{comb(15^{\circ}C)}$: densidad del combustible a 15 °C; g/ m³.

V_t : flujo volumétrico de combustible; m³/h.

T_{amb} : temperatura ambiente en el sitio; °C.

P_{amb} : presión ambiente en el sitio; hPa .

T_{aef} : temperatura del aire de enfriamiento; °C.

El cálculo del flujo de combustible consumido, se realiza utilizando la corrección de volumen por temperatura y afectándolo después por el valor de la densidad a 15 °C, dada en el certificado de calidad del análisis de combustible.

4.6.1.1. Resultados obtenidos en el cálculo del consumo específico del MCI-09

Para desarrollar este cálculo se deben considerar los parámetros garantizados por el fabricante de los MCI, sus tolerancias y condiciones, estas son:

Condiciones ISO 3046

- ✓ Temperatura del aire ambiente: 25 °C
- ✓ Temperatura del agua de enfriamiento a la entrada del enfriador de aire: 25 °C
- ✓ Presión barométrica: 1000 hPa

Valores garantizados bajo las condiciones ISO 3046

- ✓ Potencia en los terminales del generador (al 100 % de carga): 8100 kW
- ✓ Consumo específico de combustible, medido en los terminales del motogenerador: 193,7 g/kW·h, con una desviación admisible de + 5 %.

Tipo y características del combustible

- ✓ Fuel oil pesado, con las propiedades que se relacionan.

Calidad	Densidad a 15 °C (kg/dm³)	Viscosidad a 50 °C (mm²/s)	Poder calórico inferior (MJ)
HFO	0,98110	160,3	41,03

Tipo de MCI

- ✓ Wäertsilä W18V32, con número PAAE 224029

Teniendo en cuenta que en la empresa Petroamazonas se dispone de los protocolo de pruebas realizada, a los motores de combustión intenta Wäertsilä W18V32 [con números PAAE 224029 (MCI-09) y PAAE 224030 (MCI-13)], por la compañía de igual nombre (Anexo 2), en este epígrafe se realiza el cálculo verificativo del consumo específico de combustible para comparar los resultados obtenidos en el presente trabajo aplicando dos normas (ISO 15550 e ISO 3046) con los reportados por el fabricante (calculados solo con la norma ISO 15550). Los resultados obtenidos por ambas partes (la compañía y la autora) se relacionan en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1.

Cálculo comparativo del consumo específico de combustible.

Norma usada/No. MCI	Consumo específico obtenido por la compañía Wäertsilä (g/kW·h)		Consumo específico calculado en el presente trabajo (g/kW·h)	
	<i>B_e</i>	<i>B_{iso}</i>	<i>B_e</i>	<i>B_{iso}</i>
ISO 15550/MCI-09	198,1	190,2	198,06	190,24
ISO 15550/MCI-13	199,7	191,7	199,74	191,72
	<i>SFOC_{amb}</i>	<i>SFOC_{iso 3046}</i>	<i>SFOC_{amb}</i>	<i>SFOC_{iso 3046}</i>
ISO 3046/ MCI-09	No se calculó	No se calculó	198,85	190,77
ISO 3046/ MCI-13	No se calculó	No se calculó	200,54	192,39

Nota: en el Anexo 2 se definen los parámetros reflejados en las Tablas 4.1 y 4.2.

Al analizar los resultados ofrecidos por la Compañía Wäertsilä a la empresa Petroamazonas EP, se infiere que los mismos son muy confiables, lo que se evidencia en la similitud que tienen con los calculados y reportados en la presente investigación [cuyos resultados detallados para la potencia nominal (8100 kW) se exponen en la Tabla 4.2].

Tabla 4.2

Cálculo verificativo del consumo específico de combustible.

Algunos datos usados en el cálculo de B_e y B_{iso}							
P_x (hPa)	P_{ra} (hPa)	T_{ra} (K)	T_x (K)	T_{cr} (K)	T_{cx} K	η_{mek} (%)	N_e (kW)
1055	1000	298	301,15	298	306,15	0,8	8100
Resultados obtenidos en el cálculo de los consumos específicos de combustible							
K (adimensional)	α (adimensional)	B_e (g/kWh)	B_{iso} (g/kWh)	B_{isoG}^* (g/kWh)	$B_{isoG}^* + 5\%$ (g/kWh)	Condición necesaria	
0,998	0,998	198,06	190,24	193,70	203,385	Se cumple	

* Se refiere a la norma ISO 3046, la cual plantea que el consumo específico garantizado (B_{isoG}), medido en los terminales del motogenerador, debe ser 193,7 g/kW·h para un 100 % de carga y se admite una desviación máxima de + 5 %. Por tanto, la condición necesaria que debe cumplirse es:

$$B_{iso} \leq B_{isoG}^* + 0,05 \cdot B_{isoG}^* \leq 193,7 \text{ g/kW}\cdot\text{h} + 0,05 \cdot 193,7 \text{ g/kW}\cdot\text{h} = 203,385 \text{ g/kW}\cdot\text{h}. \quad (4.5)$$

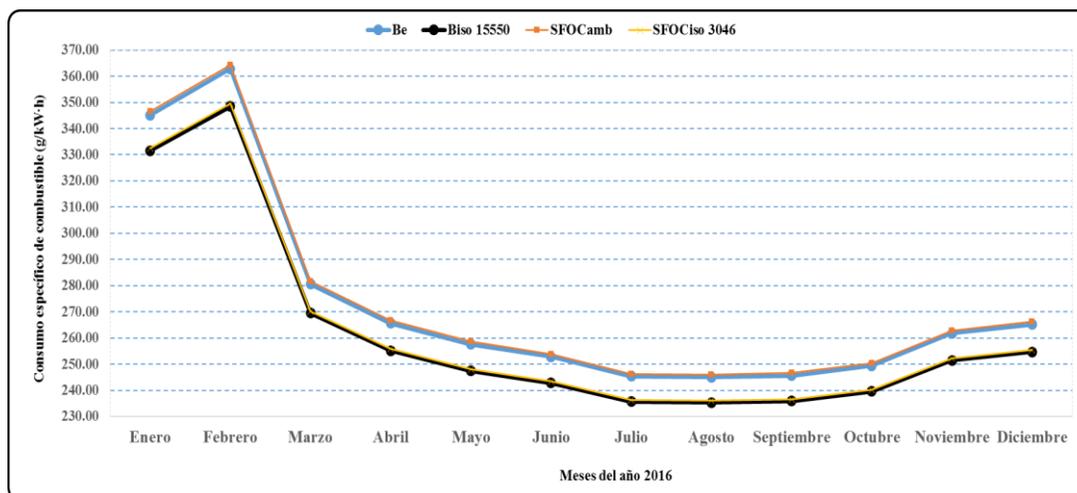


Figura 4.4. Consumo Específico de Combustible del MCI-09, Según las Normas ISO 15550 y 3046.

Igualmente, debe decirse del método alternativo empleado en la presente investigación, porque los errores relativos puntuales y promedios en que se incurren al calcular el consumo específico de combustible por la norma ISO 3046, en relación con la ISO 15550, no superan el 0,4 %, en ninguno de los casos (los errores se calculan con las ecuaciones 4.6 y 4.7, considerando como valores ciertos los obtenidos con la ISO 15550). Esta tendencia se mantuvo casi invariable para todos los meses del año 2016, como se puede observar en la Figura 4.4. Lo anterior puede ser atribuible a la pertinencia

que tienen ambos métodos (las normas ISO 15550 y 3046) para la evaluación energética de los motores de combustión interna destinados a la generación de electricidad.

$$E = \left| \frac{[B_{e(iso15550)}] - [SFOC_{amb(iso3046)}]}{B_{e(iso15550)}} \right| \cdot 100 = \left| \frac{[B_{iso(iso15550)}] - [SFOC_{iso(iso3046)}]}{B_{iso(iso15550)}} \right| \cdot 100 \quad (4.6)$$

$$E_p = \sum_{i=1}^{N_d} \left| \frac{[B_{e(iso15550)}] - [SFOC_{amb(iso3046)}]}{B_{e(iso15550)}} \right| \cdot \frac{100}{N_d} = \left| \frac{[B_{iso(iso15550)}] - [SFOC_{iso(iso3046)}]}{B_{iso(iso15550)}} \right| \cdot \frac{100}{N_d} \quad (4.7)$$

Donde:

E : error relativo puntual entre los valores de consumo específico obtenidos por ambas normas; %.

$B_{e(iso15550)}$ y $B_{iso(iso15550)}$: valores de consumo específicos experimentales y teóricos calculados mediante la norma ISO 15550; g/kW·h.

$SFOC_{amb(iso3046)}$ y $SFOC_{iso(iso3046)}$: valores de consumo específicos experimentales y teóricos calculados mediante la norma ISO 3046; g/kW·h.

E_p : error relativo promedio entre los valores de consumo específico obtenidos por ambas normas; %.

N_d : número de determinaciones realizadas para el consumo específico de combustible; adimensional.

El consumo específico de combustible en los motores de combustión interna depende de varios parámetros. Estos se relacionan en los procedimientos establecidos en el Anexo 2 y el epígrafe 4.6.1. Sin embargo, no todos los parámetros ejercen incidencia de la misma forma y magnitud. A continuación, se analizan los más influyentes.

Como se observa en la Figura 4.5, los consumos específicos de combustible [tanto el experimental (B_e) como el estándar definido en las normas ISO 15550 e ISO 3046 (B_{iso})] tienen un comportamiento inversamente proporcional a la potencia efectiva del motor (N_e), a mayor potencia menor consumo específico y viceversa, para condiciones ambientales y de operación aproximadamente constantes. Lo anterior es congruente con las ecuaciones 4.1; 4.2 y las expuestas en el Anexo 2. Sobre este particular es necesario destacar que resulta conveniente operar a los motores a valores iguales o cercanos a la

potencia indicada porque cuanto más se acerca la potencia efectiva al valor nominal (8100 kW), menor es el consumo específico. Sin embargo, el MCI-09 se operó con una potencia efectiva promedio para el año 2016 de 5969,47 kW (o sea, inferior en 2130,53 kW al valor recomendado). Esta diferencia significa que se dejaron de aprovechar importantes capacidades energéticas instaladas en el MCI y, por consiguiente, en la planta eléctrica.

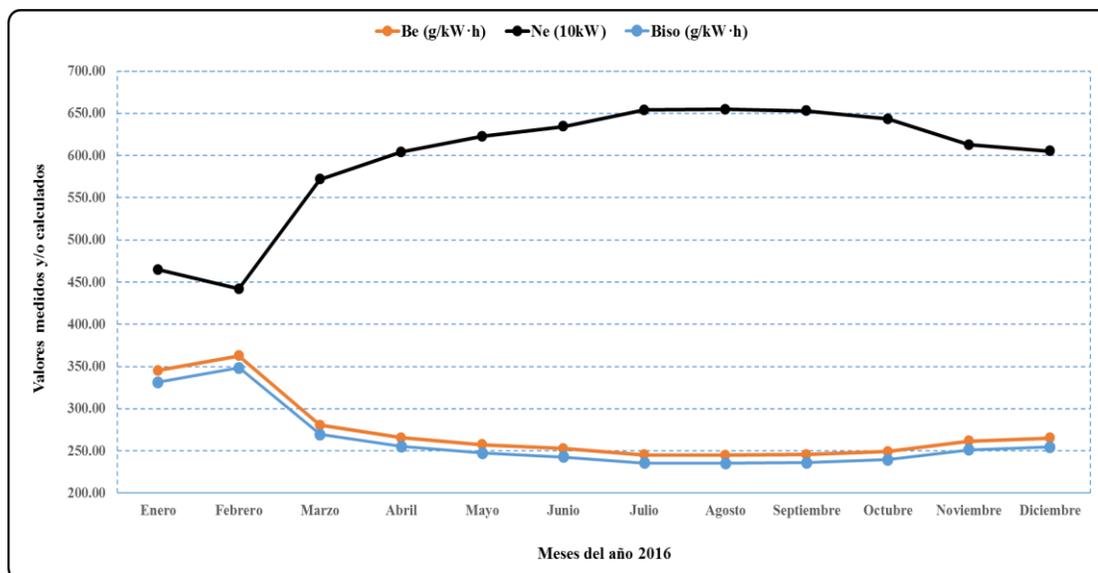


Figura 4.5. Consumo Específico de Combustible vs. Potencia Efectiva del MCI-09.

Muchos son los autores que han investigado la influencia que tiene la variación de las condiciones ambientales en el consumo específico en grupos electrógenos (Tavarez, 2008; Velazquez, Durán, 2009; Vega, 2013). En general constataron que los parámetros climatológicos no tienen una influencia significativa en el consumo específico de combustible en los equipos. En la presente investigación se corroboró la aseveración anterior, ya que se evidenció que un incremento de la presión barométrica y la temperatura del aire ambiente en 33 hPa (de 1055 a 1088 hPa) y 5,5 °C (de 28 a 33,5 %), manteniendo constante la potencia efectiva del MCI-09, no generó diferencias en los consumos experimentales (B_e) y estándares (B_{iso}) promedios.

Los resultados obtenidos para el MCI-13, en general son semejantes a los obtenidos para el MCI-09. Esto se puede observar en el resumen comparativo que se muestra en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3.

Resumen de los cálculos realizados a los MCI Wärtsilä W18V32 (09 y 13).

Año: 2016	Valores obtenidos para el MCI-09				
	Valor medido	Valores calculados según la norma ISO 15550		Valores calculados según la norma ISO 3046	
	N_e (kW)	B_e (g/kWh)	B_{iso} (g/kWh)	SFOC_{amb} (g/kW·h)	SFOC_{iso} (g/kW·h)
Enero	4647,82	345,16	331,54	346,55	332,466
Febrero	4421,90	362,80	348,48	364,26	349,452
Marzo	5718,21	280,55	269,48	281,68	270,232
Abril	6040,62	265,58	255,10	266,64	255,809
Mayo	6229,06	257,54	247,38	258,58	248,070
Junio	6345,40	252,82	242,84	253,84	243,522
Julio	6539,34	245,32	235,64	246,31	236,300
Agosto	6546,54	245,05	235,38	246,04	236,040
Septiembre	6531,32	245,63	235,93	246,61	236,590
Octubre	6432,86	249,38	239,54	250,39	240,211
Noviembre	6128,86	261,75	251,42	262,81	252,126
Diciembre	6051,72	265,09	254,63	266,16	255,340
Año: 2016	Valores obtenidos para el MCI-13				
Valor medido	Valores calculados según la norma ISO 15550		Valores calculados según la norma ISO 3046		
N_e (kW)	B_e (g/kWh)	B_{iso} (g/kWh)	SFOC_{amb} (g/kW·h)	SFOC_{iso} (g/kW·h)	
Enero	5083,74	318,25	305,47	319,53	306,543
Febrero	5849,63	276,58	265,48	277,69	266,334
Marzo	5941,51	272,30	261,37	273,40	262,142
Abril	6047,32	267,54	256,80	268,61	257,484
Mayo	6182,63	261,68	251,18	262,74	251,779
Junio	6331,05	255,55	245,29	256,58	245,808
Julio	6452,11	250,75	240,69	251,76	241,129
Agosto	6563,52	246,50	236,60	247,49	236,970
Septiembre	6552,01	246,93	237,02	247,92	237,320
Octubre	6486,52	249,42	239,41	250,43	239,650
Noviembre	6293,82	257,06	246,74	258,09	246,919
Diciembre	5949,01	271,96	261,04	273,05	261,158

Los resultados mostrados en la tabla anterior reflejan que el MCI-13 trabajó el año 2016 con una potencia efectiva promedio superior en 174,93 kW. Lo anterior generó que el valor promedio de su consumo de combustible específico real fuera inferior en 8,53 g/kW·h. Nuevamente, la evaluación energética de los motores analizados (MCI-09 y MCI-13) permite inferir la importancia que tiene, para la planta de generación, explotar los motores a valores cercanos a la potencia nominal.

4.6.2. Reevaluación energética de los MCI de la planta de generación

Como se ha indicado en el epígrafe 4.5 “Estructura de la propuesta”, corresponde ahora la reevaluación energética de los motores de combustión interna (según los procedimientos de cálculo propuestos en el capítulo 2 y el epígrafe 4.6.1), por constituir esta una importante etapa donde se calculan sus principales parámetros de operación, a fin de encontrar anomalías en el funcionamiento de los motores y las causas que la originan. Sin embargo, en las condiciones actuales no es posible la reevaluación termoenergética de los MCI debido a que la presente investigación es la primera que aborda esta trascendental temática en la empresa y, por consiguiente, en los capítulos precedentes se estableció el procedimiento para el balance energético de los motores y se aplicó a uno de los MCI de la planta de generación (el MCI-10), lo cual se hizo con los datos disponibles del año 2016 completo. Por tanto, corresponde a la empresa Petroamazonas EP capacitar a uno o varios de sus especialistas energéticos para que realicen la reevaluación energética de los motores, con base a los parámetros de operación del año 2017, los cuales no se encontraban disponibles al momento de realizar la presente investigación (a inicio del año 2017).

4.6.3. Aplicación de herramientas de la TGTEE en las plantas térmicas No. 1 y 2

En EPF la empresa Petroamazonas EP cuenta con dos plantas de generación térmica (dos galpones separados). En la planta No. 1, que es más antigua, hay siete motogeneradores [cuatro MG-LN GD 32 (utilizan crudo y gas, por eso trabajan en *fuel sharing*, compartimiento de combustible, son duales y tres son MG-SG 34 (solo trabajan con el gas asociado que se tiene en el petróleo)]. En la planta No. 2, que es más nueva, se tienen seis motogeneradores MG-W32 que trabajan sólo a crudo.

Como se ha indicado, para lograr la eficiencia energética de forma sistemática en una empresa se requiere la aplicación apropiada de un conjunto de conocimientos y métodos a los medios de trabajo, los recursos humanos, los procesos, la organización del trabajo, los métodos de dirección, control y planificación. Actualmente, resulta evidente que la empresa Petroamazonas EP no está completamente preparada para implementar la TGTEE en toda su magnitud.

Sin embargo, la autora del presente trabajo y los directivos de las plantas de generación térmica No. 1 y 2 consideran de extraordinario valor teórico y práctico la aplicación de la TGTEE, a partir de la información y los datos que se encuentran disponibles en la entidad (y a los cuales la autora tuvo acceso). Por cuanto, este trabajo es pionero en la aplicación de la TGTEE a las plantas, procesos y/o equipos de la empresa, lo cual marca un importante precedente y sienta las bases para futuros trabajos (de igual o mayor envergadura que la presente investigación) encaminados a elevar la gestión energética en Petroamazonas EP o en algunas de sus plantas, procesos y/o equipos.

Tales aspectos contribuirán con la operación eficiente de los grupos electrógenos, lo que es de mucha importancia para la empresa, por constituir los motores de combustión interna los “equipos o puestos clave” en la estructura de consumo de portadores energético de las plantas termoenergéticas.

4.6.3.1. Diagrama de Pareto

En las dos plantas de generación eléctrica se consumen varios portadores energéticos. Los de mayor interés para ambas plantas juntas se muestran en el diagrama de Pareto (Figura 4.6a). En las plantas el consumo de crudo fue el 81,58 % del total de los portadores energéticos considerados [todos en Toneladas Equivalentes de Petr6leo (TEP)]. Los resultados sugieren que en las plantas los directivos deben prestar especial atención al consumo de crudo, gas, aceite Argina y di6sel, por ese orden (Figura 4.6a). Como se infiere, en ambos casos el crudo es el portador de energ3a que representa la relaci6n 20-80, o sea, el 20 % de las causas que generan el 80 % de los efectos (Figuras 4.6a y b).

El gas consumido en la planta representa el 17,95 % del total de los portadores energ6ticos y constituye el segundo portador de energ3a de importancia estrat6gica a considerar en las plantas. Este comportamiento implica que los directivos de las plantas de generaci6n (1 y 2) y la empresa Petroamazonas EP deben enfocar el sistema de gesti6n energ6tica, fundamentalmente, a los equipos que consumen el crudo y el gas, en este orden de prioridad.

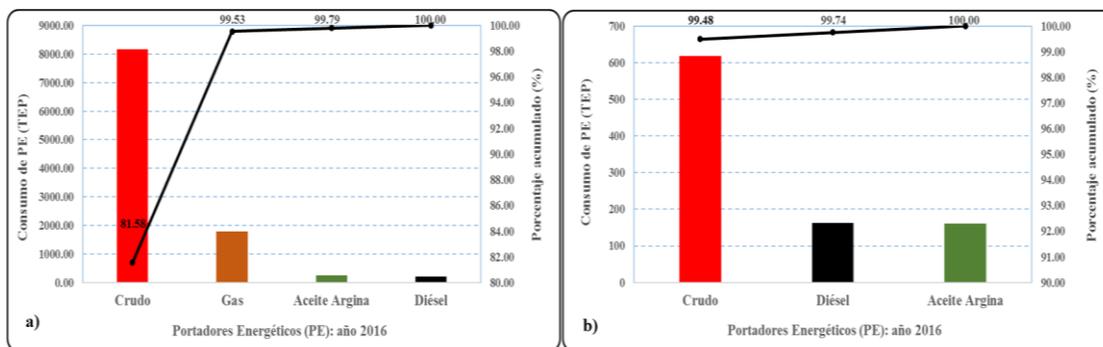


Figura 4.6. Estructura de consumo de portadores energéticos durante el año 2016.

a): estructura de consumo de portadores energéticos en las plantas de generación térmica No1, 2.

b): estructura de consumo de portadores energéticos en la planta de generación térmica No. 2.

Observaciones sobre las Figuras 4.6a y b:

Figura 4.6a: el consumo graficado, de crudo y gas, es el valor real en la escala 1:10 (valor real/10) para poder ilustrar de mejor manera los resultados debido a la notable diferencia que existe entre los consumos de crudo y gas; y el de los restantes portadores energéticos.

Figura 4.6b: el consumo graficado de crudo, es el valor real en la escala 1:100 (valor real/100).

En relación con el aceite Argina, resulta importante controlar su consumo, porque es un producto que Ecuador importa y, como se aprecia, ocupa el tercer lugar en la estructura de consumo. De igual forma, se debe ser riguroso en el control del diésel gastado, por lo estratégico que resulta. El portador energético electricidad no fue considerado, por ser plantas de generación que se autoabastecen de energía eléctrica. No obstante, se recomienda a las plantas prestar especial atención al consumo eléctrico de los equipos auxiliares, porque algunos de ellos son vitales, tanto por los consumos, como por la fiabilidad que les confieren a las plantas de generación.

4.6.3.2. Estratificación

Conocido que es el crudo el portador energético determinante en la estructura de consumo de las plantas de generación eléctrica, se procede a estratificar los resultados a

cada una de las plantas (la que utiliza crudo y gas; y la que solo consume crudo, ambas para producir electricidad) y los equipos que lo consumen (los motores de combustión interna). Además, se analizan los restantes portadores energéticos de mayor incidencia en la planta (gas, aceite Argina y Diésel).

Como se ha indicado, la empresa consta de dos plantas para la generación eléctrica. Sin embargo, en este análisis resulta de interés la planta de generación No. 2 por utilizar la mayor cantidad de crudo. El consumo total de crudo en ambas plantas fue de 571 257,54 bbl (barriles americanos), de ellos en la planta No. 2 se gastó el 75,7 % (432 579,34 bbl), todos en los MG-W32 (en la planta No. 1 solo se consumió el 24,3 % de crudo). En relación con el aceite Argina, en las plantas se consumieron 1891,32 bbl y el 61 % se empleó en los MG-W32 (en la planta No. 2) y del total de diésel consumido, el 77,8 % fue en la planta No. 2 (en los motogeneradores MG-W32). Por otra parte, el consumo en TEP de estos tres portadores juntos representó el 62,1 % del total entre todos los considerados en las dos plantas (crudo, gas, aceite Argina y diésel).

Como se infiere de los resultados obtenidos en la estratificación de los consumos, resulta estratégico enfocar los esfuerzos del personal y los recursos económicos de las plantas y la empresa en la explotación eficiente de la segunda planta (la que utiliza solo crudo), y dentro de ella a los MG-W32 porque estos producen el 67 % del total de la potencia generada en la planta. Estos aspectos hasta el momento no habían sido demostrados a partir de investigaciones rigurosas, por eso los hallazgos antes validados le confieren una elevada pertinencia a esta investigación y justifica su continuidad y desarrollo en futuros trabajos.

4.6.3.3. Gráfico de consumo y producción en el tiempo

En la Figura 4.7 se muestran los comportamientos de los consumos de los principales portadores energéticos y la energía total producida. No se observa una relación directa de la producción de energía con los consumos de crudo y gas, porque las plantas de generación No. 1 y 2 que utilizan estos portadores energéticos tienen diferentes niveles de incidencia en la producción total de energía. Lo anterior está relacionado con el total de equipos existentes en las plantas y el rendimiento térmico de los mismos. También, influyen notablemente las características de los combustibles fundamentales empleados

(crudo y gas), entre la que se destaca la potencia calorífica (poder calórico) inferior y los lastres e impurezas, que pueden afectar en mayor o menor medida la eficiencia del proceso de combustión en los motores de combustión interna.

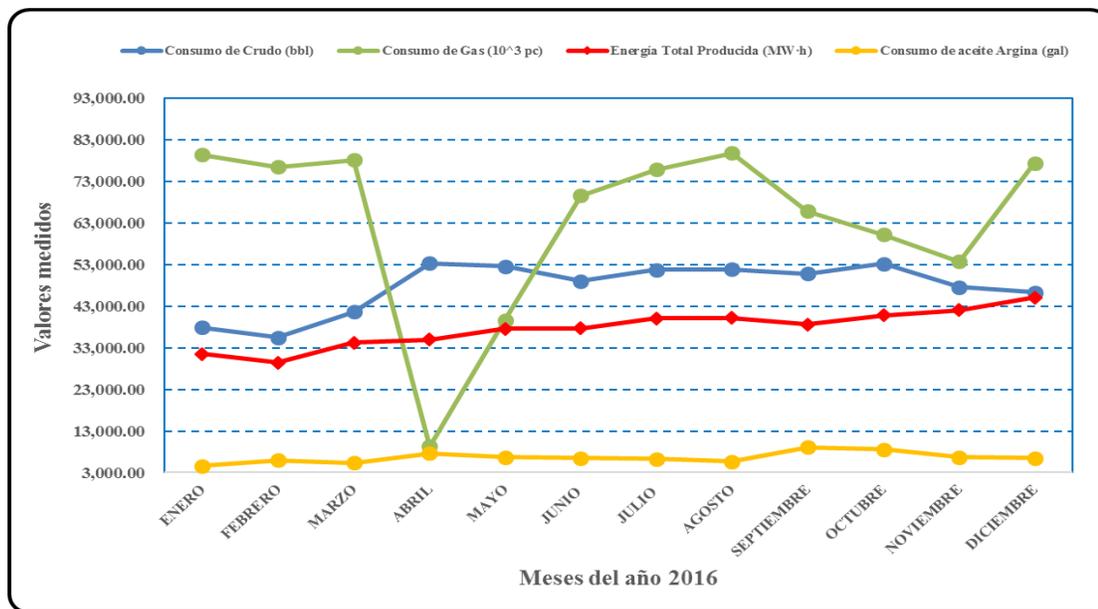


Figura 4.7. Consumos (crudo, gas y aceite Argina) y producción de energía vs. tiempo

Se destaca que en el mes de abril el consumo de gas se redujo considerablemente, respecto al valor promedio del año y, como se aprecia (Figura 4.7), se incrementó el consumo de crudo para poder producir la energía que demanda el proceso productivo. Contrariamente, en diciembre se incrementó abruptamente el consumo de gas (respecto al mes precedente) y se nota claramente una reducción del consumo de crudo en igual periodo. Esta situación evidencia que entre las plantas (a crudo y gas, y a crudo) existe una relación de complementariedad, esta posibilita que al fallar una de ellas la otra asuma la producción de energía y de esta manera se cumplen los compromisos de entrega de energía eléctrica pactados, y que además son necesarios para el proceso de producción de petróleo.

De forma análoga, el consumo de aceite Argina experimentó crecimientos en abril, y en el periodo septiembre-octubre, ambos aumentos en términos generales pueden ser atribuibles a la situación antes descrita. El segundo puede estar influenciado, además, por la eficiencia del trabajo del conjunto motor-generator (al menos en octubre) porque el

consumo de aceite en el referido mes debió ser superior a septiembre, porque en este mes el consumo de gas bajó y el de crudo se elevó. Este comportamiento evidencia la importancia que tiene evaluar sistemáticamente el desempeño termoenergético de los motores de combustión interna.

4.6.3.4. Diagrama del índice de consumo vs. producción

Al valorar el consumo específico de los grupos de motogeneradores se aprecia que los motores GD-CRO presentan gastos más elevados que los W32 (excepto en febrero). Además, se nota que durante todo el año mostraron ciertas fluctuaciones, alcanzado sus valores máximos en marzo y julio, mientras que en febrero fue inferior a todos los meses (Figura 4.8).

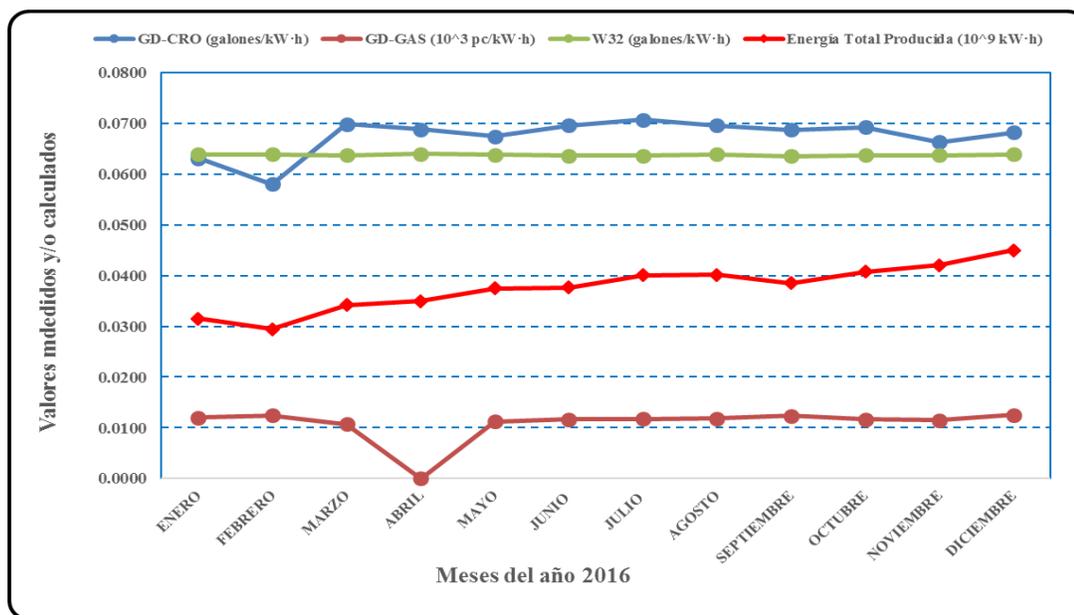


Figura 4.8. Índice de consumo vs. producción en el tiempo.

Sin embargo, los motogeneradores W32 mantuvieron todo el año un índice de consumo (consumo específico de crudo) estable e inferior, en su valor promedio, al de sus homólogos que emplean el combustible crudo. Esto es a pesar de producir la mayor cantidad de energía entre las dos plantas. Este aspecto remarca, una vez más, la importancia estratégica que supone diseñar una estrategia de gestión total eficiente de la energía, donde los motores Wärtsilä W32 sean los puestos clave a considerar. En el caso

de los equipos que trabajan a gas y crudo, igualmente deben ser evaluados con rigor, por ser el gas el portador de energía más consumido en las plantas después del crudo.

4.6.4. Aplicación de herramientas de la norma ISO 50001 en las plantas térmicas

4.6.4.1. Consumo de combustible no asociado a la producción

Entre los parámetros más importantes a considerar en el costo de producción de energía eléctrica en una central térmica se encuentra el consumo de combustible de los MCI. En las plantas de generación No. 1 y 2 de la empresa se emplean simultáneamente varios combustibles (crudo, diésel y gas). Al valorar ambas plantas juntas se aprecia que el 37,71 % del consumo total no está asociado directamente a la producción de electricidad (Figura 4.9). Este comportamiento permite inferir que existen reservas energéticas potencialmente aprovechables, particularmente en la planta No. 1.

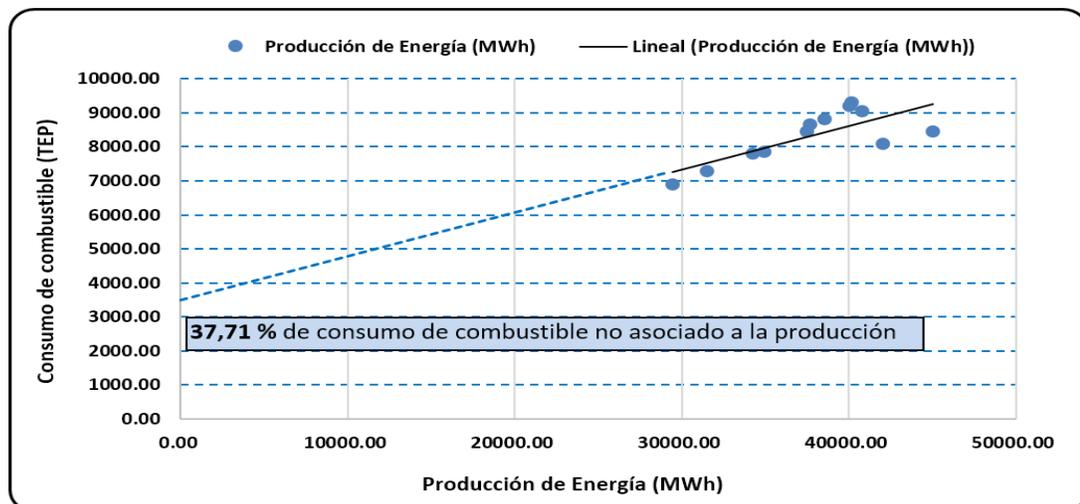


Figura 4.9. Consumo de combustible considerando las plantas No. 1 y 2.

A través de la ecuación 4.8 se describe la relación entre las dos variables analizadas: consumo de combustible (CC) y producción de energía (PE), en TEP y MWh, respectivamente.

$$CC = 0,1278 \cdot PE + 3509,5 \quad (\text{para las plantas No. 1 y 2 juntas}) \quad (4.8)$$

Por su parte, al analizar la planta No. 2 de forma independiente se corrobora que el consumo de combustible no asociado a la producción de energía es de 0,37 % (Figura 4.10). Lo anterior puede ser atribuible al favorable desempeño energético que presentan

los motores W32 que se explotan en la instalación. El modelo que relaciona a los parámetros analizados lo constituye la ecuación 4.9.

$$CC = 0,2165 \cdot PE + 22,157 \quad (\text{para la planta No. 2 independiente}) \quad (4.9)$$

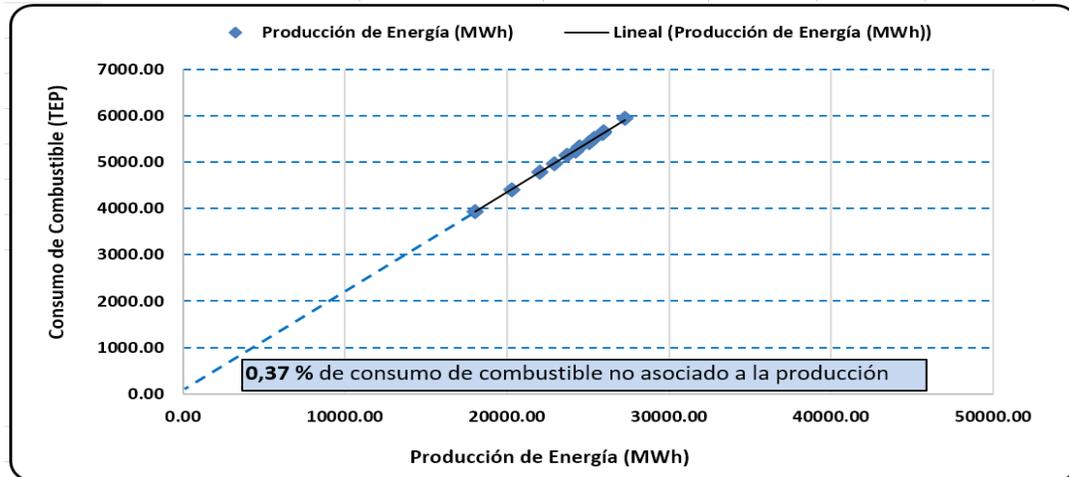


Figura 4.10. Consumo de combustible considerando solo la planta No. 2.

4.6.4.2. Índice de consumo de combustible y línea base

Este parámetro refleja la cantidad de combustible (calculado en TEP) que se consume para producir un MWh. Como se ilustra en la Figura 4.11 en las dos plantas oscila entre 0,183 y 0,231 TEP/MWh. Sin embargo, la línea base establecida por la empresa para este parámetro corresponde al valor de 0,220 TEP/MWh. El mismo fue superado en reiteradas ocasiones durante el año, particularmente en el periodo enero-septiembre debido a irregularidades en el funcionamiento de los motores a gas. En relación con lo anterior, resulta notorio el bajo valor alcanzado en los meses de noviembre y diciembre. El mismo estuvo condicionado por el buen desempeño energético de los motores W32.

En la planta No. 2 el valor del índice de consumo se reduce en 0,005 TEP/MWh, respecto a cuando se trabajan la dos plantas de conjunto (Figura 4.12). Igualmente, la línea base se establece en un valor inferior debido a las buenas prestaciones energéticas que caracteriza a estos MCI.

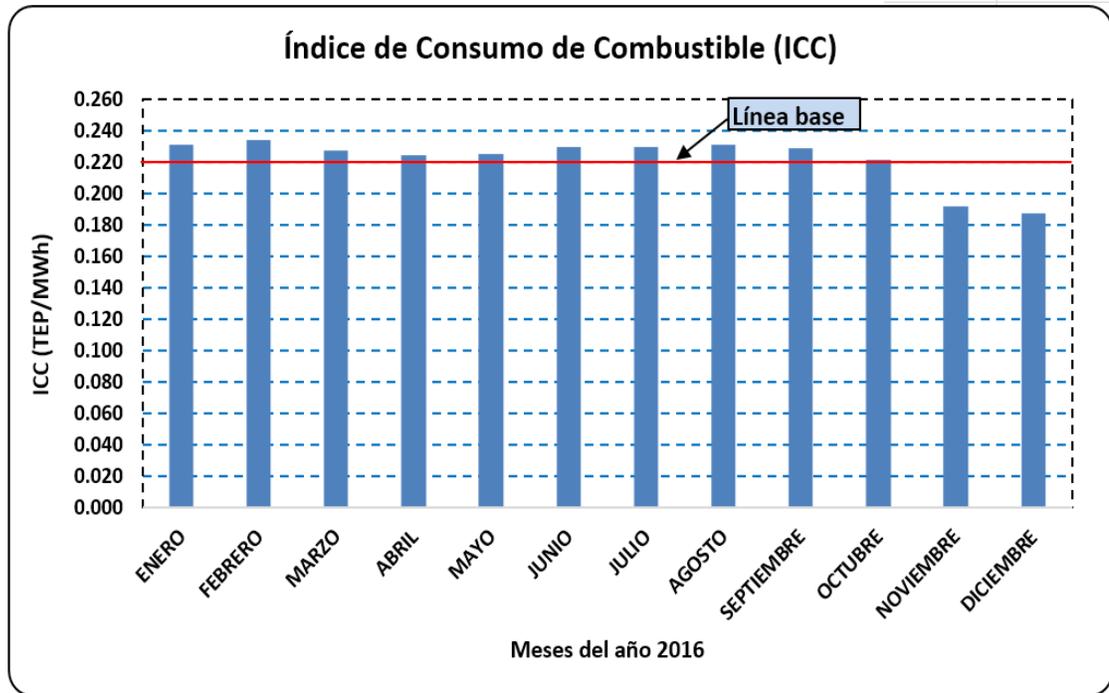


Figura 4.11. Índice de consumo de combustible considerando las dos plantas.

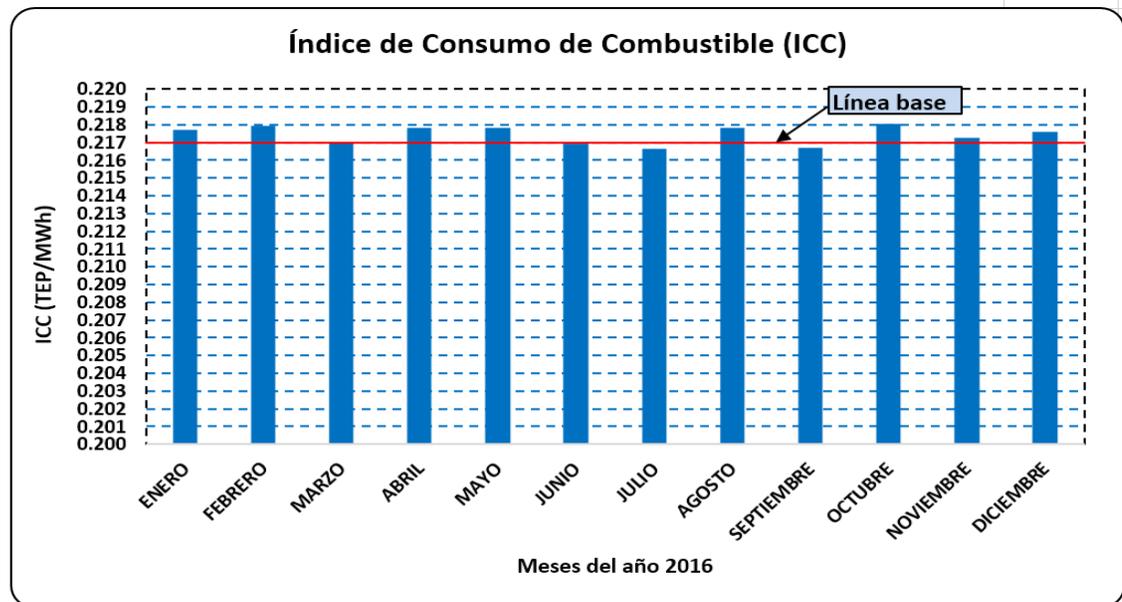


Figura 4.12. Índice de consumo de combustible considerando solo la planta No. 2.

4.7. Consideraciones sobre la valoración económica, social y ambiental de la propuesta

Los resultados de la investigación permiten inferir que los métodos actualmente aplicados, para la gestión energética en las plantas de generación térmica No. 1 y 2, generan importantes ahorros económicos, asociados al consumo de energía en los motogeneradores. Asimismo, es razonable considerar que existen potencialidades relacionadas con el impacto ambiental y social de las plantas que al día de hoy no son suficientemente aprovechadas. En el Anexo 5 se establecen criterios para el análisis de los impactos económicos, ambientales y sociales de la producción de energía.

Adicionalmente, se destaca que a la fecha no es posible desarrollar un análisis riguroso de los impactos económicos, ambientales y sociales asociados a la propuesta realizada en la presente investigación porque la misma incluye la aplicación de la TGTEE y la norma ISO 50001 en las plantas de la empresa y para ello se requiere de un proyecto de implementación que garantice toda la logística necesaria para este propósito. No obstante, en el capítulo precedente se valoran aspectos económicos ambientales de interés para la empresa.

4.8. Conclusiones del capítulo 4

- ✦ Se estableció un procedimiento para la operación eficiente de los motogeneradores Wärtsilä W18V32. El mismo considera, como acciones fundamentales, la determinación del consumo específico de combustible mediante el protocolo de prueba correspondiente, la reevaluación energética de los motores de combustión interna, y la implementación de un sistema integral de gestión energética en las plantas de generación térmica, basado en la aplicación de herramientas de la TGTEE y la norma ISO 50001. Tales aspectos, les confieren novedad y valor teórico-práctico a la propuesta desarrollada.
- ✦ En las plantas de generación térmica No. 1 y 2 de la empresa Petroamazonas EP, se gasta mayoritariamente crudo, gas, aceite Argina y diésel. El consumo de la segunda planta representó el 62,1 % entre todos los portadores energéticos considerados y los motogeneradores Wärtsilä W32 constituyen los equipos clave sobre los cuales se debe incidir en el ahorro de energía, porque consumieron el

75,7 % del total de crudo utilizado y produjeron el 67 % de la potencia total generada.

- ✦ La implementación de herramientas de la norma ISO 50001 en las plantas de generación evidenció que solo el 62,29 % del combustible consumido está directamente asociado a la producción de energía eléctrica. Además, se corroboró que el índice de consumo de combustible osciló entre 0,183 y 0,231 TEP/MWh.

CONCLUSIONES GENERALES

- ✦ El marco teórico-contextual desarrollado evidenció que la producción de electricidad, utilizando hidrocarburos y sus derivados en motogeneradores, tiene gran incidencia en la empresa Petroamazonas EP. Además, corroboró que las investigaciones precedentes no consideran la evaluación energética de los parámetros fundamentales de funcionamiento de los motores Wärtsilä W18V32 y su incidencia en la operación de los equipos electrógenos explotados en el campo Edén Yuturi del Bloque 12.
- ✦ Los procedimientos establecidos para el cálculo de los principales parámetros de funcionamiento de los motores Wärtsilä W18V32 se obtuvieron del balance energético. Estos se implementaron adecuadamente debido a que los equipos electrógenos están dotados de instrumentos, accesorios y un programa de adquisición de datos que garantizan calidad en el registro y control de las variables del proceso de generación de electricidad. Además, se aplicaron técnicas de medición efectivas que confieren confiabilidad a los datos experimentales empleados en la evaluación energética del objeto de estudio.
- ✦ La evaluación energética del MCI-10 demostró que en el mismo se produjo una adecuada utilización del calor. El 41,13 % de la energía térmica disponible en el crudo se transformó en potencia efectiva y los rendimientos indicado y mecánico alcanzaron el 50,83 y 81,75 %, como promedio. Además, se comprobó que el motor tiene gran incidencia en la operación del equipo electrógeno porque consumió el 16,20 % del dinero gastado en la producción de energía eléctrica en la planta No. 2 (514 474 023,51 USD). Sus emisiones de gases contaminantes fueron inferiores a las normas vigentes en el Ecuador.
- ✦ El procedimiento propuesto para la operación eficiente de los motores Wärtsilä W18V32 se basa en la aplicación de herramientas de la TGTEE y la norma ISO 50001. El mismo considera previamente el cálculo del consumo específico de combustible y la reevaluación energética de los MCI. La aplicación de las referidas herramientas, en las plantas de generación térmica No. 1 y 2 de la empresa, patentizó que el consumo de la segunda representó el 62,1 % entre los portadores energéticos

considerados, los motores Wärtsilä W32 gastaron el 75,7 % del crudo utilizado y produjeron el 67 % de la potencia total generada. Por tanto, la planta No. 2 y los motores W32 constituyen puestos clave sobre los que se debe incidir en el ahorro de energía. Su índice de consumo promedio fue estable e igual a 0,217 TEP/MWh

RECOMENDACIONES

- ✦ Generalizar la evaluación energética a todos los motores de combustión interna explotados en las plantas térmicas de generación eléctrica del campo Edén Yuturi del Bloque 12.
- ✦ Investigar la incidencia que tienen los procesos de combustión y de gestión del mantenimiento en el comportamiento de los principales parámetros energéticos de los motogeneradores.
- ✦ Crear condiciones logísticas (incluyendo la medición puntual del consumo de electricidad en cada planta, motor de combustión interna y equipo auxiliar) y preparar al talento humano para la implementación de la TGTEE y la norma ISO 50001 en la empresa Petroamazonas EP.
- ✦ Realizar un estudio económico detallado para determinar los impactos que tendría para la empresa Petroamazonas EP la aplicación de la propuesta desarrollada en este trabajo.
- ✦ Emplear el presente informe como material de consulta para el talento humano de las plantas térmicas de generación eléctrica de la empresa Petroamazonas EP y para los estudiantes de grado y posgrado de la Universidad Técnica de Cotopaxi.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. *ABRUS, LTDA. Informe de monitoreo de emisiones a la atmósfera de fuentes fijas de combustión-bloque 12 (primer trimestre 2016), preparado para Petroamazonas EP. APE2016-01. 2016a. 30 p.*
2. *ABRUS, LTDA. Informe de monitoreo de emisiones a la atmósfera de fuentes fijas de combustión-bloque 12 (segundo trimestre 2016), preparado para Petroamazonas EP. APE2016-01. 2016b. 35 p.*
3. *ABRUS, LTDA. Informe de monitoreo de emisiones a la atmósfera de fuentes fijas de combustión-bloque 12 (tercer trimestre 2016), preparado para Petroamazonas EP. APE2016-01. 2016c. 32 p.*
4. *ABRUS, LTDA. Informe de monitoreo de emisiones a la atmósfera de fuentes fijas de combustión-bloque 12 (cuarto trimestre 2016), preparado para Petroamazonas EP. APE2016-01. 2016d. 35 p.*
5. *Aróstegui, J. M. Metodología del Conocimiento Científico. La Habana: Editorial de Ciencias Sociales, 1978. 445 p.*
6. *Banda, P. Simulación de un sistema recuperador de calor para gases de escape de motogeneradores a crudo. Tesis de Ingeniería. Universidad Central del Ecuador. 2015. 105 p.*
7. *Barahona, F. Desarrollo, construcción y pruebas de un sistema de uso de biogás como combustible en un motogenerador eléctrico rural. Tesis de Ingeniería. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. 2013. 88 p.*
8. *Borja, L.; R. Navas. Eficiencia y transformación energética: modificación de una motocicleta de combustión interna a energía eléctrica. Tesis de Licenciatura en Electromecánica Automotriz. Universidad San Francisco de Quito. 2013. 95 p.*
9. *Borman, G.; K. Nishiwaki. Internal combustion engine heat transfer. Progress in Energy Combustion Sciences, 1987, 13(1): 1-46.*
10. *Borroto, A. Recomendaciones metodológicas para la implementación de sistemas de gestión de la energía según la norma ISO 50001. Programa CYTED. 2013. 70 p.*
11. *Borroto, A.; J. Monteagudo. Gestión Energética en el Sector Productivo y los Servicios. Maestría en eficiencia energética. Editorial Universidad de Cienfuegos. 2006. 95 p.*

12. Borroto, A.; Rubio, A. *Combustión y Generación de vapor. Maestría en eficiencia energética. Universidad de Cienfuegos. 2007. 248 p.*
13. Buñay, F.; F. Pérez. *Comparación de costos de producción de energía eléctrica para diferentes tecnologías en el Ecuador. Tesis de Ingeniería. Universidad de Cuenca. 2012. 150 p.*
14. Buttsworth, D. *Transient response of an erodable heat flux gauge using finite element analysis. Proc. Instn. Mech. Engrs, part D. Journal of Automobile engineering, 2002, 216(1): 701-706.*
15. Choy, R.; K. Morozov. *Elementos de construcción y cálculo de motores de combustión interna. La Habana: Editorial pueblo y educación. 1983. 141 p.*
16. Coello, L. *Comportamiento del desgaste de los motores de combustión interna de los camiones articulados Volvo A35C, mediante el diagnóstico del lubricante. Tesis de Ingeniería. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 2005. 50 p.*
17. *Constitución de la República del Ecuador: incluye las reformas aprobadas en el Referéndum y Consulta Popular de 7 de mayo de 2011 y las Enmiendas Constitucionales publicadas en el Registro Oficial No. 653 del 21 de diciembre de 2015. Asamblea Nacional. República del Ecuador. 222 p.*
18. Córdova, A. *Análisis del Sistema de Combustible y Lubricación de los Motores de Combustión Interna de una Planta de Generación para prolongar los periodos de Mantenimientos Mayores. Tesis de Ingeniería. Escuela Superior Politécnica del Litoral. 2014. 121 p.*
19. Durán, E. *La generación distribuida y sus retos frente al nuevo marco legal del mercado eléctrico ecuatoriano. Tesis de Maestría. Universidad de Cuenca. 2013. 239 p.*
20. Durán, Y. *Evaluación de la batería de grupos electrógenos de Moa, bajo condiciones medio ambientales locales. Tesis de Ingeniería. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 2009. 53 p.*
21. Fassler, R. *Evaluación de los consumos de energía en el sistema de inyección de agua en el yacimiento M1 en el campo Edén Yuturi, bloque 12 operado por Petroamazonas EP, en el año 2015. Diseño de un sistema de recuperación secundaria energéticamente eficiente. Tesis de Maestría. Universidad Técnica de*

- Cotopaxi (UTC)*. 2016. 176 p.
22. Fernández, J. *Influencia de los combustibles en el funcionamiento de los motores de combustión interna*. La Habana: Editorial pueblo y educación. 1998. 161p.
 23. Finol, C.; K. Robinson. *Thermal modelling of modern engines: a review of empirical correlations to estimate the in-cylinder heat transfer coefficient*. *Journal Automobile Engineering*, 2006, 202(1): 1765 – 1781.
 24. Fygueroa, S; J. Araque. *Problemas de Motores de Combustión Interna*. Editorial Consejo de Estudios de Postgrado. Universidad de los Andes. Mérida-Venezuela. 1ra Edición. 2003. 149 p.
 25. Gómez, S.; M. De Armas; E. Navarro; F. Ramos. *Inteligencia Artificial aplicada a la distribución de carga en un sistema de cogeneración*. *Revista Energética*, 2008, 39(1): 1-10.
 26. González R.; Y. Rodríguez; S. García; L. Fernández. *Consumo de combustible de los motores de combustión interna*. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 2010, 19(1): 1-12.
 27. González, D. *Evaluación de la batería de grupos electrógenos de Moa trabajando bajo condiciones medio ambientales locales*. Tesis de Ingeniería. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 2008. 50 p.
 28. Guerra, C.; A. Menéndez; R. Barrera; E. Egaña. *Estadística*. La Habana: Editorial Félix Varela, 2003. 376 p.
 29. Gutiérrez, J. *Generación eléctrica en plantas DIESEL*. *Anales de mecánica y electricidad*. 2000, 4(1): 59-62.
 30. Guzmán, D. *Modelación, simulación y control del tanque de contacto y los enfriadores de licor en el proceso de lixiviación carbonato amoniacal*. Tesis Doctoral. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 2001. 124 p.
 31. Guzmán, J. *Diseño de experimentos para Ingenieros Mecánicos*. Santiago de Cuba: Ediciones ISJAM, 1986. 321 p.
 32. Heywood, J. *Internal combustion engine fundamentals*. Mc-Graw Hill, 1988.
 33. ISO 15550:2012. *Motores de Combustión Interna – Determinación y Métodos para la Medición de la Potencia del Motor*. Publicado por Instituto Ecuatoriano de Normalización. 2012. 43p.

34. ISO 50001:2011. *Sistemas de gestión de la energía - Requisitos con orientación para su uso. Publicado por la Secretaría Central de ISO. Ginebra, 2011. 34 p.*
35. Kavtaradze, A.; V. Gaivoronskii; A. Fedorov; D. Onishchenko; A. Shibanov. *Calculation of radiative-convective heat transfer in the combustor of Diesel engine. High Temperature, 2007, 45(5): 673–680.*
36. Labañino, N. *Diagnóstico energético de las calderas de vapor de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”. Tesis de Ingeniería. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 2015. 70 p.*
37. Legrá, A.; O. Silva. *La investigación científica: Conceptos y Reflexiones. La Habana: Editorial Félix Varela, 2011. 445 p.*
38. Lozano, M. Ramos, J. *Análisis Energético y Económico de Sistemas Simples de Cogeneración. Universidad de Zaragoza. Información Tecnológica, 2007, 18(5): 75-84.*
39. Lucenko, B. *Modelación matemática de los procesos tecnológicos químicos en máquinas analógicas. Moscú: Izdat, 1984.*
40. Malhotra, H. *Co-generation & combined heat and power (chp) success stories/ failed/ barriers, suggestion/comments/ recommendation to make this technology implementable in industries. Senior Manager (Project). Present policies in support of chp. Delhi, 2004.*
41. Mantilla, J; C. Fallas; J. Gómez. *Simulación del flujo de gas en ductos de escape de motores de combustión interna. Primera parte: aspectos teóricos. Revista Ingeniería e Investigación, 2009, 29(1): 115-125.*
42. *Manual de instrucción de Motores Wärtsilä W18V32. Wärtsilä Services Main Office Vaasa, Finland, 2012. 474 p.*
43. Miller, I.; J. Freund; R. Jonson. *Probabilidades y estadísticas para ingenieros. La Habana: Editorial Félix Varela, 2005. 2 t.*
44. *Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos. Balance energético nacional. República del Ecuador. 2015. 54 p.*
45. *Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos. Balance energético nacional. República del Ecuador (Parte I). 2016. 118 p.*
46. Miño, M. *Análisis de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad (RAM) de un*

- motor de combustión interna Wäertsilä 18V32 LNGD. Tesis de Maestría. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. 2015. 131 p.*
47. Montgomery, D. *Diseño y análisis de experimentos. La Habana: Editorial Félix Varela, 2004. 325 p.*
 48. Murillo, J. *Estudio de las curvas características de motor del vehículo Chevrolet Sail 2012 con el uso de hidrógeno como combustible. Tesis de Ingeniería. Universidad Internacional del Ecuador. 2016. 80 p.*
 49. Pérez, L. *Generadores de vapor. Editorial Pueblo y Educación. La Habana. 1972. 447 p.*
 50. *Petroamazonas EP: Memoria de Sostenibilidad. Proyecto Gerencia de Responsabilidad Social y Relaciones Comunitarias. 2013. 104 p.*
 51. Quitiaquez, W. *Diagnóstico del consumo de energía eléctrica en el proceso de destilación de agua en los Laboratorios de Ciencias de la Vida de la Universidad Politécnica Salesiana, Sede Quito, Campus Girón, durante el año 2014. Implementación de un destilador solar térmico. Tesis de Maestría. Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC). 2015. 131 p.*
 52. *Registro Oficial No. 418: Tercer Suplemento. Asamblea Nacional. Ley orgánica del servicio público de energía eléctrica. República del Ecuador. 28 p.*
 53. Rey, E. *Diagnóstico energético del proceso de generación de vapor en la Central Termoeléctrica de la empresa "Comandante Pedro Sotto Alba". Tesis de Ingeniería. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 2014. 59 p.*
 54. Reyes, J. *Diseño e implementación de un laboratorio de motores de combustión interna para el aprendizaje didáctico de los estudiantes de la carrera de Ingeniería en Electromecánica de la Universidad Técnica de Cotopaxi Extensión La Maná, año 2015. Tesis de Ingeniería. Universidad Técnica de Cotopaxi Extensión La Maná. 2015. 131 p.*
 55. Reyes, J. *Prácticas de laboratorio de motores de combustión interna de pistón. La Habana: Editorial pueblo y educación. 1983.141p.*
 56. Reyes, J.; P. Alcove. *Problemas de teoría de los motores de combustión interna. La Habana: Departamento de ediciones del ISPJAE. La Habana. 1985. 230 p.*
 57. Reyes, J.; R. Pérez; K. Morozov. *Teoría de los motores de combustión interna. La*

- Habana: Editorial pueblo y educación. 1983. 407 p.*
58. *Rodríguez, M. Evaluación de los parámetros operacionales del sistema de bombeo para tratamiento de flujo, bloque 12 operado por Petroamazonas EP, en el año 2015. propuesta de una metodología para la operación de rendimiento eficiente. Tesis de Maestría. Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC). 2016. 158 p.*
 59. *Romero, C. contribución al conocimiento del comportamiento térmico y la gestión térmica de los motores de combustión interna alternativos. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. 2009. 351 p.*
 60. *Roque, D.; B. Roque. Thermo-economic assessment of a multi-engine, multi-heat-pump CCHP (combined cooling, heating and power generation) system - A case study. Energy, 2010, 35(1) 3540 – 3550.*
 61. *Rubio, A. Generadores de vapor. Funcionamiento y explotación. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Editorial Feijóo Santa Clara. Cuba. 2015. 489 p.*
 62. *Ruiz, R. Evaluación de la cogeneración en motores de combustión interna de la batería fuel oil de Felton. Tesis de Ingeniería. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 2013. 63 p.*
 63. *Santos, W. Evaluación del potencial de biomasa residual del ganado vacuno para el aprovechamiento energético en la hacienda Galpón del cantón Salcedo provincia de Cotopaxi año 2013. Diseño de un biodigestor alternativo para este propósito. Tesis de Maestría. Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC). 2015. 176 p.*
 64. *Schallenberg, J.; G. Piernavieja; C. Hernández; P. Unamunzaga; R. García; M. Díaz; D. Cabrera; G. Martel; J. Pardiña; V. Subiela. Energías renovables y eficiencia energética. 1ra edición. Instituto Tecnológico de Canarias, S.A. 2008. 148 p.*
 65. *Soluciones para Centrales Eléctricas. DBAD061363ES/Copyright © Wärtsilä Corporation. 2014. 96 p.*
 66. *Stewart, J. Cálculo con trascendente tempranas. 4 ed. La Habana: Editorial Félix Varela, 2009. 3 t.*
 67. *Tatschl, R.; B. Basara; J. Schneider; K. Hanjalic; M. Popovac; A. Brohmer; J. Mehring. Advanced turbulent heat transfer modeling for IC-engine applications*

- using AVL FIRE. *International Multidimensional Engine Modeling User's Group Meeting*. April 2, 2006, Detroit.
68. Tavaréz, H. *Cálculo de los parámetros que caracterizan el trabajo del motor de combustión interna 7 de la batería de grupos electrógenos Moa. Tesis de Ingeniería. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 2007. 50 h.*
 69. Tijonov, A.; A. Samarky. *Ecuaciones de la física matemática. Moscú: Editorial MIR, 1980. 824p.*
 70. Tijonov, O. *Modelos matemáticos sencillos en los procesos metalúrgicos (en idioma ruso). San Petersburgo: Instituto de Minas, 1978. 398p.*
 71. Torres, E. *Modelación matemática y simulación del transporte neumático del mineral laterítico. Tesis Doctoral. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 2003. 105 p.*
 72. Túqueres, R. *análisis de viabilidad técnica del uso de biodiesel en centrales termoeléctricas. Tesis de Ingeniería. Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito. 2015. 118 p.*
 73. Vega, A. *E Cálculo verificativo de los parámetros de funcionamiento del motor # 3 de combustión interna Hyundai 9H25/33 del emplazamiento de Felton. Tesis de Ingeniería. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 2013. 60 p.*
 74. Velázquez, D. *Establecimiento del rango del índice de consumo de combustible en la batería de grupos electrógenos de Moa. Tesis de Ingeniería. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 2008. 50 p.*
 75. Vinardell, J. *Implementación del secado solar de menas lateríticas en las empresas niquelíferas cubanas. Tesis de Maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 2011. 63 p.*
 76. Vsórov, B. *Manual de motores Diésel para tractores. 7810 IVT Diesel, Editorial MIR, Moscú, Rusia, 2002.*
 77. Vukalovitch, M. *Propiedades termodinámicas del agua y el vapor. Editorial. Revolucionaria. La Habana. 1978. 245 p.*

BIBLIOGRAFÍA

1. *Batista, M. Metodología para la determinación de las reservas energéticas en el Sistema Electroenergético Nacional. Tesis de Maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, 2004. 94 p.*
2. *Borroto, A; F. González; M. De Armas. Temas avanzados de cogeneración y generación descentralizada. Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente. Universidad de Cienfuegos. 2008. 83 p.*
3. *Coello, L. Comportamiento del desgaste de los motores de combustión interna de los camiones articulados Volvo A35C, mediante el diagnóstico del lubricante. Tesis de Ingeniería. Instituto superior minero metalúrgico de Moa. 2005. 50 p.*
4. *Comisión Nacional para el Ahorro de Energía. Diseño de Sistemas de Cogeneración. CONAE. Secretaría de Energía. México. 1995.*
5. *De Lucas, M. A. Termotecnia básica para ingenieros químicos. Procesos termodinámicos y máquinas. Colección ciencia y técnica. Universidad de Castilla La Mancha. España. 1990.*
6. *Degraeuwe, B. Contribución al modelado de la transmisión de calor en los MCIA. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. España. 2006.*
7. *Dolz, V. Contribución al modelado de la transmisión de calor en los MCIA y su aplicación en el aprovechamiento energético de los gases de escape durante los transitorios de carga. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. España. 2006.*
8. *Faires, V. Termodinámica. La Habana: Edición Revolucionaria. 1991. 807 p.*
9. *Fernández, C. Termodinámica Técnica. La Habana: Editorial Felix Varela. 1994. 3t.*
10. *Fernández, J. Influencia de los combustibles en el funcionamiento de los motores de combustión interna. La Habana: Editorial pueblo y educación, 1998. 16 p.*
11. *Llamo, E.; J. Collado. Diagnóstico Energético de Segundo Nivel en la Refinería "Hnos. Díaz" y CUBALUB. En: XV Forum de Ciencia y Técnica DIP-PAEC, Santiago de Cuba. 2003.*
12. *Monteagudo J.; A. Borroto. La "Producción Equivalente". Un método para elevar la efectividad de los Índices Energéticos. En: III Taller caribeño de energía y medio ambiente. CEEMA, UCF. Cuba. 2004.*

13. Pang, H.; C. Brace. *Review of engine cooling technologies for modern engines. Proc. Instn. Mech. Engrs., part D: Journal Automobile Engineering, 2004, 218(1): 1209-1215.*
14. Perry, J. *Chemical Engineering Handbook. 6ta Edición. Mc Graw Hill, New York, 1985.*
15. Reyes M. *Desarrollo de un modelo para el análisis térmico de MCIA. Seminario en el CMT. Universidad Politécnica de Valencia. España. 2003.*
16. Reyes M. *Modelo de transferencia de calor para colectores de escape de motores alternativos. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. España. 1993.*
17. Rizhkin, Y. *Centrales termoeléctricas. Primera y segunda parte. Editorial Pueblo y Educación. Ciudad de La Habana. 1985.*
18. Santos, R. *Estudio del aprovechamiento de la energía de los gases de escape en motores Diésel. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. 1999.*

ANEXO 1.

DATOS DE FUNCIONAMIENTO RECOMENDADOS PARA LOS MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA WÄRTSILÄ W18V32

Temperaturas, (°C)		
	Valores normales	Límites de alarma (parada)
Carga	100 %	0 - 100 %
Aceite de lubricación antes del motor	60 - 65	75 (80) ²⁾
Aceite lubricante después del motor	10 - 13 mayor	
Agua AT después del motor	91 - 96 ¹⁾	105 (110) ²⁾³⁾
Agua AT antes del motor	5 - 8 menor	50
Incremento del agua de AT en el turbocompresor ^{xx)}	8 - 12	
Agua BT antes del enfriador de aire de sobrealimentación	28 - 38	45 (60) ⁵⁾
Aire de sobrealimentación en el receptor	50 - 60	75
Gases de escape después del cilindro	Ver registros de pruebas	500 (520) ²⁾
Gases de escape antes del turbocompresor		-
Precalentamiento de agua AT	50 (MDO) 70 (HFO)	45
Temp. de las camisas	130 - 150	160 (180) ²⁾
Temp. de los cojinetes principales	90 - 100	110 (120) ²⁾
Presiones manométricas (bar)		
	Valores normales	Límites de alarma (parada)
Carga	100 %	0 - 100 %
Aceite lubricante antes del motor, a una velocidad de 600 rpm (10,0 rps)	4,5	3,0 (2,0)
720 RPM (12,0 rps) - 750 RPM (12,5 rps)	5,0 - 5,5	3,0 (2,0)
Agua de AT/BT antes de la bomba de agua de AT/BT (estática)	0,7 - 1,5	
Agua AT antes del motor	2,5 + pres. estática. ¹⁾	1,5 + pres. estática. (2) ^{2) 4)}
Agua BT antes del enfriador de aire de sobrealimentación	2,5 + pres. estática. ¹⁾	1,5 + pres. estática.
Combustible antes del motor	7 -8 (HFO/LFO)	4
Combustible antes del motor, "Common Rail"	11 -12 (HFO/LFO)	4
Aire comprimido (arranque y control)	máx. 30	18
Aire de carga (salida del enfr.)	Ver registros de pruebas	3

Fuente: Manual de instrucción de Motores Wärtsilä W18V32, 2012.

Leyenda:

1)- Dependiendo de la velocidad y de la instalación; 2)- Reducción de carga, motor principal; 3)-Parada, motor auxiliar; 4)- Parada, buques clasificados por el GL, motor principal; xx)- En caso de que se utilice un turbocompresor refrigerado por agua y 5)- Sólo en condiciones especiales

ANEXO 2.

MÉTODO USADO POR LA COMPAÑÍA WÄRTSILÄ PARA EL CÁLCULO DEL CONSUMO ESPECÍFICO DE CRUDO EN LOS MCI W18V32, SEGÚN NORMA ISO 15550

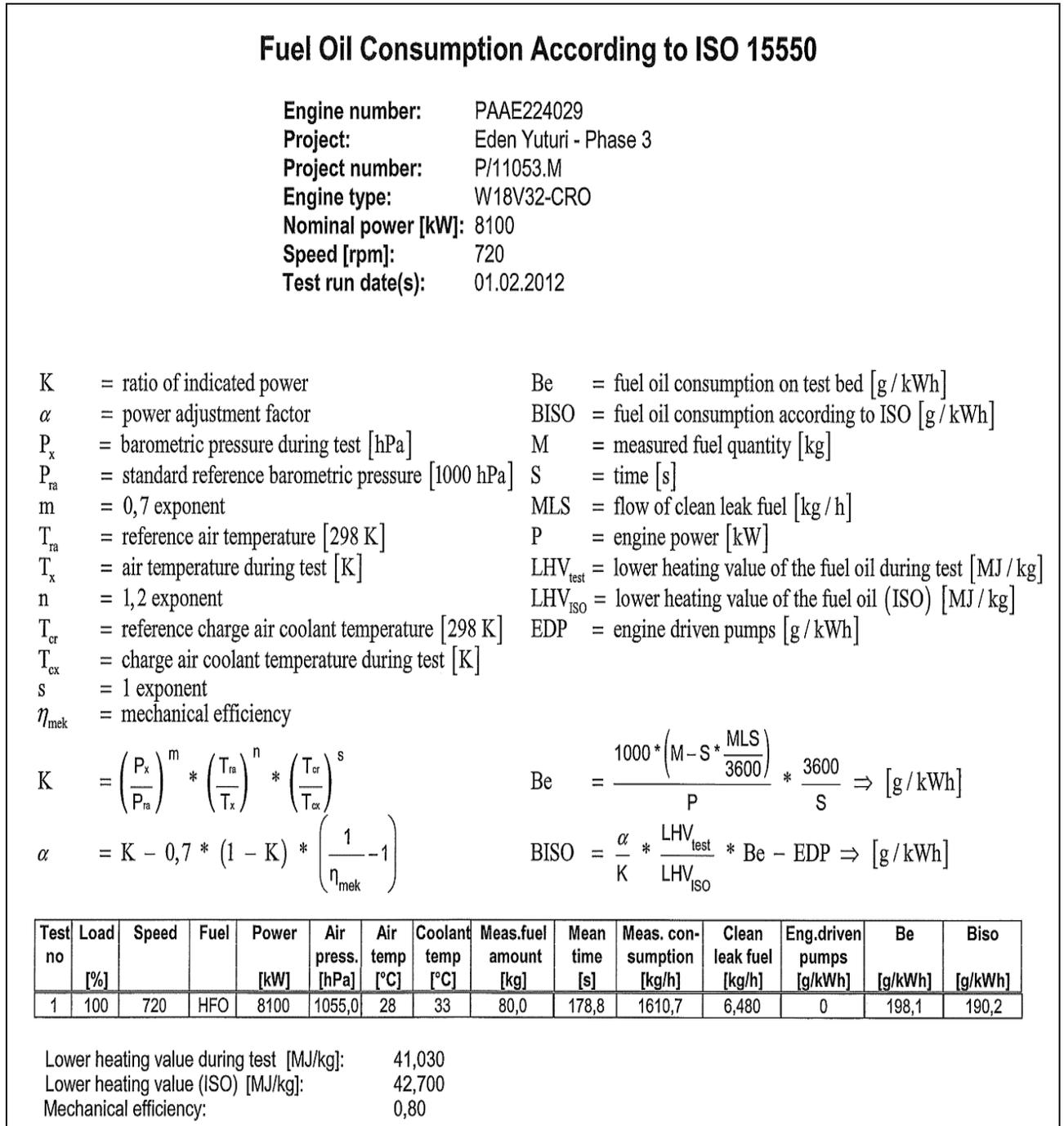


Figura 1. Prueba de consumo específico de crudo practicada por la compañía Wärtsilä al Motor de Combustión Interna W18V32 (el MCI No. 9 de la planta de generación térmica).

ANEXO 3.

PROCEDIMIENTOS Y HERRAMIENTAS DE LA TECNOLOGÍA DE GESTIÓN TOTAL EFICIENTE DE LA ENERGÍA APLICADOS EN LA PRESENTE INVESTIGACIÓN

DIAGRAMA DE PARETO

Los diagramas de Pareto son gráficos especializados de barras que presentan la información en orden descendente, desde la categoría mayor a la más pequeña en unidades y en por ciento. Los porcentajes agregados de cada barra se conectan por una línea para mostrar la suma incremental de cada categoría respecto al total.

El diagrama de Pareto es muy útil para aplicar la Ley de Pareto o Ley 80 – 20, que identifica el 20 % de las causas que provoca el 80 % de los efectos de cualquier fenómeno estudiado.

Utilidad del diagrama de Pareto

- ✓ Identificar y concentrar los esfuerzos en los puntos clave de un problema o fenómeno como puede ser: los mayores consumidores de energía de la fábrica, las mayores pérdidas energéticas o los mayores costos energéticos.
- ✓ Predecir la efectividad de una mejora al conocer la influencia de la disminución de un efecto al reducir la barra de la causa principal que lo produce.
- ✓ Determinar la efectividad de una mejora comparando los diagramas de Pareto anterior y posterior a la mejora.

ESTRATIFICACIÓN

Cuando se investiga la causa de un efecto, una vez identificada la causa general aplicando el diagrama de Pareto, es necesario encontrar la causa particular del efecto, aplicando sucesivamente Pareto a estratos más profundos de la causa general. La estratificación es el método de agrupar datos asociados por puntos o características comunes pasando de lo general a lo particular. Pueden ser estratificados los gráficos de control, los diagramas de Pareto, los diagramas de dispersión, los histogramas y otras herramientas de descripción de efectos.

Utilidad de la Estratificación

- ✓ Discriminar las causas que están provocando el efecto estudiado.
- ✓ Conocer el árbol de causas de un problema o efecto.
- ✓ Determinar la influencia cuantitativa de las causas particulares sobre las generales y sobre el efecto estudiado.

GRÁFICO DE CONSUMO Y PRODUCCIÓN EN EL TIEMPO

Consiste en un gráfico que muestra la variación simultánea del consumo energético con la producción realizada en el tiempo. El gráfico se realiza para cada portador energético importante de la empresa y puede establecerse a nivel de empresa, área o equipos.

Utilidad de los gráficos de consumo y producción en el tiempo

- ✓ Muestran períodos en que se producen comportamientos anormales de la variación del consumo energético con respecto a la variación de la producción.
- ✓ Permiten identificar las causas que producen variaciones significativas de los consumos.

Variaciones anormales en el gráfico de consumo y producción en el tiempo

Generalmente debe ocurrir que un incremento de la producción produce un incremento del consumo de energía asociado al proceso y viceversa. Comportamientos anómalos son: Incrementa la producción y decrece el consumo de energía; Decrece la producción y se incrementa el consumo de energía; y la razón de variación de la producción y el consumo (ambos creciendo o decreciendo), son significativos en el período analizado.

DIAGRAMA DEL ÍNDICE DE CONSUMO – PRODUCCIÓN

Este gráfico es muy útil para establecer sistemas de gestión energética, y estandarizar procesos productivos a niveles de eficiencia energética superiores. Valores del índice de consumo por debajo del índice durante el periodo de referencia comparativa, indican un incremento de eficiencia del proceso. Además, sobre este gráfico se pueden establecer las metas de reducción del índice proyectadas para el nuevo periodo e ir controlando su cumplimiento.

Utilidad del diagrama de índice de consumo vs. producción

- Evaluar el comportamiento de la eficiencia energética de la empresa en un período dado.
- Establecer metas de índices de consumos en función de una producción planificada.
- Determinar el punto crítico de producción de la empresa o de productividad de un equipo y planificar estos indicadores en las zonas de alta eficiencia energética.
- Determinar factores que influyen en las variaciones del índice de consumo a todos los niveles.

Observación: la información expuesta en este anexo se encuentra suficientemente detallada en la fuente bibliográfica consultada (Borroto y Monteagudo, 2006).

ANEXO 4.

MODELO DE SISTEMA DE GESTIÓN DE LA ENERGÍA PARA LA NORMA ISO 50001

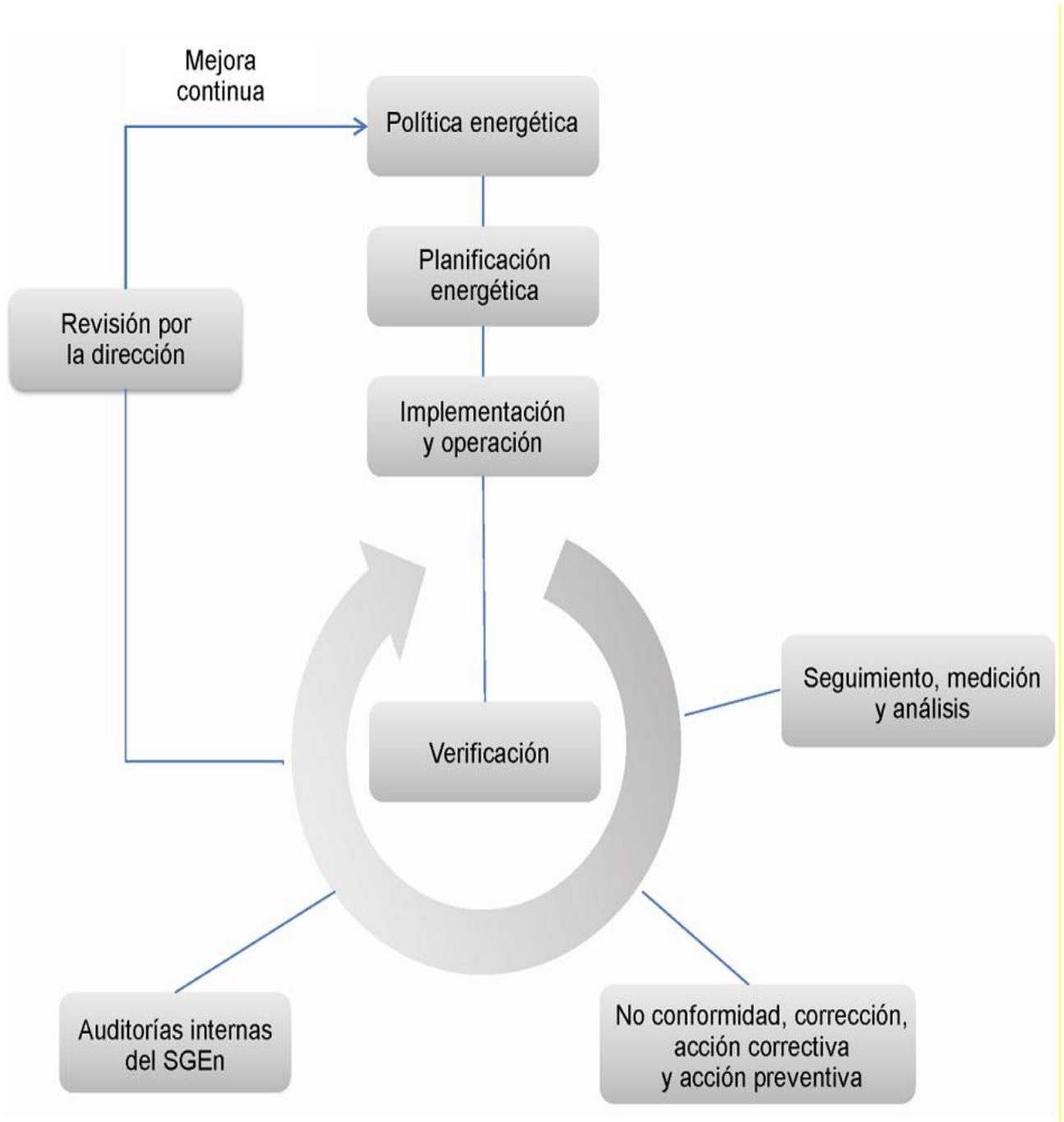


Figura 3. Flujograma para la implementación del modelo de sistema de gestión de la energía para la norma ISO 50001.

Fuente: ISO 50001, 2011.

ANEXO 5.

COSTOS INTERNOS Y EXTERNOS DE LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Costos de la producción de energía eléctrica

En una economía de mercado, como la ecuatoriana, el mecanismo de los precios determina la utilización de los recursos para diferentes usos competitivos. En los análisis económicos tradicionales solo se tienen en cuenta los costos directos o internos de la producción de energía; sin embargo, existen una serie de costos externos o externalidades de este proceso que no se reflejan en los precios de la energía en el mercado, como es el caso de los impactos sociales y ambientales. Los precios en el mercado solo reflejan los intereses de los productores y consumidores directamente vinculados en el proceso energético dado, y no los de toda la sociedad en su conjunto, pues los costos externos son generalmente pagados por terceras partes no responsables de los mismos, lo que constituye una injusticia manifiesta (Borroto y Monteagudo, 2006).

Por tanto, una condición básica para que el mecanismo de los precios conduzca a una solución óptima para toda la sociedad, es que incorpore, no solo los costos directos de la producción de energía (costos internos), sino también los costos externos (llamados costos sociales o ecológicos,) proceso conocido como internalización de las externalidades.

Costos directos o internos

De acuerdo con Borroto y Monteagudo (2006), los costos internos son aquellos que están estrechamente vinculados con los gastos directos del proceso de producción de energía, y que se manifiestan a través de las relaciones entre productores y consumidores. Por ejemplo, para una central productora de energía estos estarán compuestos por:

- ✓ **Capital (tecnología):** los costos asociados son de planeación (proyecto); de adquisición de la tecnología; de transporte, montaje e instalación; del terreno.
- ✓ **Combustible**
- ✓ **Operación y mantenimiento:** salarios; materiales; impuestos, inspecciones y seguros; e intereses sobre capital.
- ✓ **Desmontaje**
- ✓ **Otros**

Costos externos o sociales

En la literatura especializada se brindan diversas definiciones y categorías de costos externos. Algunos de los posibles efectos que deben ser considerados en estos costos son: impactos sobre la salud humana; daños a la flora y la fauna; daños medioambientales y cambios climáticos globales; costos a largo plazo debido al agotamiento de las reservas energéticas; impactos macroeconómicos, como es el caso del desempleo; y costos debido a la probabilidad de guerras y sus consecuencias.

Aunque pueden enumerarse muchos de los posibles efectos, uno de los más estudiados hoy día son los cambios climáticos globales, provocados por la emisión de los “gases de invernadero”.

El contenido de CO₂ en la atmósfera es el principal factor desencadenante del efecto invernadero, que se traduce en un aumento de la temperatura ambiental, lo cual ocasionaría cambios apreciables en el planeta. Existen diversos modelos matemáticos que permiten predecir estos cambios; en algunos casos se plantea que dentro de 50 años el contenido de CO₂ en la atmósfera aumentará en un 30 %, lo que provocará un incremento de la temperatura entre 1,66 y 4,4 °C. Otros investigadores plantean que a los ritmos actuales de emisiones, si no se toman las medidas necesarias y prima el criterio económico en la selección de las fuentes de energía, el contenido de CO₂ pudiera duplicarse para el año 2030, lo que provocaría un incremento de la temperatura en 2,5 °C.

Este fenómeno puede originar, dentro de otras, las siguientes consecuencias: aumento del nivel del mar; alteración de los regímenes de precipitación; aumento de tormentas e inundaciones; corrimiento de las zonas climáticas hacia los polos; y daños irreversibles a la biodiversidad del planeta al producirse la pérdida de ecosistemas.

Si en los esquemas actuales no se incluyen los costos externos de la producción de energía, simplemente se están transfiriendo estos costos a las generaciones futuras, que indiscutiblemente estarán en desventaja al vivir en un mundo mucho más contaminado y con el peligro latente de la irreversibilidad de los cambios producidos.

Diversos autores han apuntado la discrepancia entre los costos de la energía en el mercado, reflejo de los costos internos, y los costos totales para la sociedad. Esta discrepancia fue señalada por Pigou en el año 1912. Pero no es hasta finales de la década de los 70, cuando los impactos ambientales se hicieron cada vez más evidentes, que se toma plena conciencia de los costos externos de la energía y de la necesidad de su internalización.

En la literatura especializada se reportan diversas vías y métodos para determinar los costos externos; sin embargo, no existe consenso en la aplicación de uno en particular.

No obstante, se pueden señalar dos tendencias o enfoques generales: la estimación de los daños directos y la determinación de los costos de abatimiento o control. El primer enfoque se basa en traducir a términos monetarios los daños causados (impacto ambiental) por un determinado elemento o tecnología, el segundo se enfoca a determinar los costos de control o de abatimiento del impacto causado.

En la actualidad los investigadores trabajan en la aplicación de estos métodos para la estimación de los costos externos de la producción de energía. En un informe para la Comisión de la Comunidad Europea, se realiza un cálculo de los posibles costos que traería una duplicación o triplicación del contenido de CO₂ en la atmósfera para el año 2030. En la Tabla 1 se ofrece un resumen de los estimados presentados en el informe, considerando que cada tonelada de CO₂ emitida al medio tiene un costo externo de 500 USD.

En otros casos se ha calculado el costo unitario externo (USD/kW·h), en función del tipo de tecnología, evidentemente siendo superior para las tecnologías basadas en combustibles fósiles, que para las basadas en fuentes renovables de energía (Tabla 2).

Tabla 1. Costos externos estimados en base a que se duplique o triplique el CO₂ en la atmósfera.

Impacto	Costo (trillones de USD)	
	2 x CO ₂	3 x CO ₂
Aumento de temperatura	1,84	3,68
Aumento del nivel del mar	2,94	9,96
Alteración de los regímenes de evaporación-precipitación	901,05	1802
Tormentas e inundaciones	1,5	3
Costo total	907	1819

Fuente: Borroto y Monteagudo, 2006

En este sentido, los costos totales de la producción de energía eléctrica a partir de las fuentes convencionales pudieran igualarse a la fotovoltaica, y superar en varias veces la producida en plantas eólicas. En la Tabla 2 se exponen los valores estimados de los costos externos.

Tabla 2. Costos externos estimados según la tecnología empleada.

Categoría	Carbón	Petróleo	Ciclo Comb. Turbinas Gas	Nuclear	Eólica
	USD/kW·h				
Salud humana/accidentes	0,7 - 4,00	0,7 - 4,80	0,10 - 0,20	0,03	0,04
Cultivos/flora	0,07 - 1,5	1,6	0,08	pequeña	0,08
Edificaciones	0,15 - 5,00	0,2 - 5,00	0,05 - 1,8	pequeña	0,10 - 0,33
Desastres	-	-	-	0,11 - 2,50	-
Daños globales	0,05 - 24,0	0,5 - 1,3	0,3 - 0,7	0,02	0,018
Totales	1,70 - 40,0	3,7 - 18,7	0,83 - 1,86	0,36 - 50	0,4 - 1,00

Fuente: Borroto y Monteagudo, 2006

Luego, los costos totales de la producción de energía debieran determinarse según la ecuación 1.

$$C_t = C_i + C_e \quad (1)$$

Donde C_t ; C_i y C_e son los costos totales, internos y externos, respectivamente; USD/kW·h.

ANEXO 5.

SOLICITUD A EXPERTOS PARA VALIDACIONES