UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas

FIMI
Facultad de
Ingeniería Mecánica
e Industrial

Centro de Estudios Energéticos y Tecnologías Ambientales

TRABAJO DE DIPLOMA

Título: Modelación termoeconómica de un emplazamiento de grupos electrógenos con una distribución óptima de cargas en sus motores

Autor: Andy Jiménez Mirabal

Tutor: Pablo Romelio Roque Díaz

Santa Clara , Junio 2019

Copyright©UCLV

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas

FIMI
Facultad de
Ingeniería Mecánica
e Industrial

Center of Energy Studies and Enviromental Tecnologies

DIPLOMA THESIS

Title: Thermoeconomic modeling of a generator set site with an optimal loads distribution in its engines

Author: Andy Jiménez Mirabal

Thesis Director: Pablo Romelio Roque Díaz

Santa Clara , June, 2019
Copyright©UCLV

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

Atribución- No Comercial- Compartir Igual

Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419

ÍNDICE

Abstract **2**

Introducción **3**

Capítulo 1: Marco teórico referencial **5**

1.1 Grupos Electrógenos 5

1.1.1 Contaminación provocada por los Grupos Electrógenos 6

1.2 Exergía 7

1.2.1 Definición y tipos de exergía 7

1.2.2 Rendimiento exergético 9

1.2.3 Consideraciones termodinámicas 10

1.3 Investigaciones precedentes relacionadas 10

Capítulo 2: Desarrollo de los cálculos en el grupo electrógeno objeto de estudio **13**

2.1 Caracterización del grupo electrógeno Santa Clara Industrial 13

2.1.1. Capacidad instalada. 13

2.1.2. Descripción de los motores Hyundai, 1.7 MW 13

2.2 Modelo general diseñado para el cálculo de optimización de la distribución de cargas en los motores de un emplazamiento de grupos electrógenos 17

2.3 Optimización de la distribución de cargas en los motores del emplazamiento objeto de estudio 19

2.3.1 Datos de Partida 19

2.3.2 Valores óptimos de cada motor 20

2.3.3 Valores óptimos de cada motor para una potencia total asignada 21

2.3.4 Análisis de resultados 24

2.4 Cálculo exergético 26

2.4.1 Datos de partida 26

2.4.2 Balance exergético 27

2.4.3 Impacto económico 29

2.4.4 Impacto ambiental 32

Capítulo 3: Creación de un software a través de Matlab como herramienta para facilitar los cálculos **34**

3.1 Matlab y su uso en la ingeniería 34

3.2 Software COMGE 35

3.2.1 Página Principal 35

3.2.2 Módulo “Optimización” 35

3.2.3 Módulo “AEGE” 38
Conclusiones 42
Recomendaciones 43
Bibliografía 44

Resumen

Se crea un modelo físico-matemático que optimice la distribución de cargas en los motores de un emplazamiento de grupos electrógenos, se aplica el modelo en el emplazamiento de grupos electrógenos de Fueloil Santa Clara Industrial, se comparan los resultados con la distribución de cargas realizada por el usuario distribuyendo la misma cantidad de carga total deseada a cada motor en cantidades iguales, se obtiene como resultados que con el modelo optimizado se ahorran 7 CUC por hora, disminuye 0.001 CUC/kWh el costo exergoeconómico unitario de la energía eléctrica y disminuye en 0.2 % el flujo de contaminantes al medio ambiente.

Abstract

A physical-mathematical model is created to optimize the distribution of loads in the engines of a generating set site, the model is applied to the generating set site of Fueloil Santa Clara Industrial, the results are compared with the distribution of loads made by the user distributing the same amount of total desired load to each engine in equal amounts, it is obtained as results that with the optimized model are saved 7 CUC per hour, decreases 0.001 CUC/kWh the unit exergoeconomic cost of electric energy and decreases the flow of pollutants to the environment by 0.2%.

Introducción

El creciente conocimiento acerca de que los recursos energéticos son limitados ha provocado que muchos países reexaminen sus políticas de energía y tomen medidas drásticas para evitar el desperdicio. También ha desatado el interés en la comunidad científica para considerar más de cerca a los dispositivos de conversión de energía y desarrollar nuevas técnicas que permitan utilizar mejor los recursos existentes.

La política energética de Cuba en los últimos años ha estado encaminada a la introducción paulatina de emplazamientos de grupos electrógenos en el Sistema Eléctrico Nacional por ello se han realizado varios estudios en aras de mejorar estos emplazamientos ya sea por modificaciones internas o por la instalación de sistemas de cogeneración, sin embargo, la mayoría de estos proyectos requieren, para su puesta en marcha, de una inversión relativamente alta que dificulta este proceso, aún así existe la posibilidad de obtener los mismos resultados con una cantidad menor de combustible, con menos contaminación ambiental y sin requerir de una inversión inicial.

Partiendo de una realidad problemática que tiene como *causa: la necesidad de incrementar las herramientas matemáticas que valoren la distribución de carga en los motores de un emplazamiento de grupos electrógenos*, surge el siguiente **problema ingenieril**: La carga total demandada en un Emplazamiento de Grupos Electrógenos puede distribuirse de una mejor manera para cada uno de sus motores; este problema *trae como consecuencias: la elevación injustificada del costo exergoeconómico unitario del kWh generado y el aumento de la contaminación ambiental provocada por el proceso de generación de energía eléctrica en el emplazamiento*. Precisamente el aporte de este trabajo de diploma es optimizar esta distribución por ello tiene como **Objetivo general:** *Formular un modelo físico-*

matemático que optimice la distribución de cargas de los motores de un emplazamiento de grupos electrógenos.

Como **objetivos específicos:**

- Calcular la disminución del costo de operación y del costo exergoeconómico unitario del kWh que puede ocasionar la aplicación del modelo optimizado.
- Evaluar cuantitativamente el impacto ambiental que produce optimizar la distribución de cargas.
- Programar un software en Matlab que facilite los cálculos de optimización y los cálculos exergoeconómicos.

Capítulo 1: Marco teórico referencial

1.1 Grupos Electrógenos

Un grupo electrógeno es el conjunto compuesto por un motor de combustión interna que mueve un generador eléctrico. Son comúnmente utilizados cuando hay déficit en la generación de energía eléctrica de algún lugar, o cuando son frecuentes los cortes en el suministro eléctrico. Así mismo, la legislación de los diferentes países puede obligar a instalar un grupo electrógeno en lugares en los que haya grandes densidades de personas como centros comerciales, restaurantes, cárceles, edificios administrativos, etc. Una de las utilidades más comunes es la de generar electricidad en aquellos lugares donde no hay suministro eléctrico, generalmente son zonas apartadas con pocas infraestructuras y muy poco habitadas. Otro caso sería en locales de pública concurrencia, hospitales, fábricas, etc., lugares en los que la energía eléctrica de red es insuficiente, necesiten de otra fuente de energía alterna para abastecerse.

En la red eléctrica nacional cubana estos han sido utilizados, por lo general, para compensar las interrupciones de energía de las redes de distribución, donde la falta de esta puede causar daños importantes o donde la red eléctrica no está disponible, es insuficiente o no es rentable como por ejemplo: lugares muy apartados o de difícil acceso, donde llevar la electricidad de forma tradicional no es económico por las grandes distancias; islas o pequeños asentamientos en parajes intrincados (Fernández et al., 2010)

Los GE poseen dos regímenes de funcionamiento: Grupos de generación o producción y Grupos de emergencia, y de acuerdo a estos regímenes de funcionamiento individual estos pueden prestar servicios generando energía eléctrica (Fernández et al., 2007):

• De forma continua durante 24 horas e ininterrumpidamente como generación base.

• De forma intermitente para servicios donde es necesario equilibrar los consumos y cubrir picos de consumo.
• Como servicio de emergencia, en hospitales, (etc.).

De acuerdo con su explotación presentan diferentes modos de operación:
• Operación continúa a carga constante: Operación del grupo sin tiempo límite tomando en consideración los períodos de mantenimiento. Ejemplo: Operando como carga base en ciclo combinado.
• Operación continúa a carga variable: Operación del grupo sin tiempo límite tomando en consideración los períodos de mantenimiento. Ejemplo: Cuando el grupo opera en una localización donde no existe otra instalación o donde la alimentación de la instalación existente no es confiable.
• Operación limitada a carga constante: Se define como la operación del grupo limitada en tiempo a carga constante. Ejemplo: Cuando el grupo opera en paralelo con alguna instalación o con el sistema durante los períodos de carga pico.
• Operación limitada en tiempo a carga variable: Se define como la operación del grupo limitada en tiempo a carga variable.

El caso que se analiza en este trabajo de diploma es un grupo electrógeno de generación, que trabaja de forma continua.

1.1.1 Contaminación provocada por los Grupos Electrógenos

Se entiende por contaminación atmosférica la presencia en el aire de materias o formas de energía que impliquen riesgo, daño o molestia grave para las personas y bienes de cualquier naturaleza. Siempre ha existido contaminación atmosférica de origen natural, por erupciones volcánicas, incendios, tormentas de arena, descomposición de la materia orgánica o polen, pero es a partir del descubrimiento del fuego por el hombre cuando aparece la contaminación atmosférica antropogénica o contaminación atmosférica en sentido estricto(Elsom, 1990), la cual ha cobrado importancia, sobre todo, a partir de la revolución industrial y el uso masivo de combustibles fósiles como fuente de energía (Graedel and Grutzen, 1989).

Aunque se puede originar contaminación atmosférica por escapes o arrastres de gases u otro material volátil, almacenado o utilizado de diversas formas, la principal fuente de contaminación son los procesos que implican combustión, al producirse la oxidación de los distintos elementos que componen los combustibles, las materias primas y el aire (Aránguez et al., 1999).

Para lograr la alta calidad del combustible en los Grupos Electrógenos, es necesario someterlo a un proceso de centrifugado o limpieza, con el objetivo de eliminar las impurezas mecánicas, el agua y partículas que se incorporan durante su transportación y almacenamiento. En el proceso de centrifugación del combustible diesel o fueloil se genera un residual líquido oleoso producto de los lavados que se realizan con agua a presión, para eliminar las impurezas que se encuentran en el interior de la centrifuga, y también se genera cada una tonelada de combustible centrifugado 10 litros de lodo (Torres, 2011).

Estos MCI al quemar el combustible expulsan a la atmósfera gases de escape los cuales son contaminantes para la atmósfera. Estos gases están compuestos básicamente por dos gases: nitrógeno (N_2) y oxígeno (O_2). En un volumen determinado de aire se encuentra una proporción de nitrógeno (N_2) del 79 % mientras que el contenido de oxígeno es aproximadamente de un 21%. El nitrógeno durante la combustión, en principio, no se combina con nada y tal como entra en el cilindro es expulsado al exterior sin modificación alguna, excepto en pequeñas cantidades, para formar óxidos de nitrógeno (NOx). El oxígeno es el elemento indispensable para producir la combustión de la mezcla (Martínez, 2016).

1.2 Exergía

1.2.1 Definición y tipos de exergía

El término exergía fue acuñado por Z. Rant en 1953 y literalmente significa “capaz de un trabajo externo” (Sciubba and Wall, 2007). Antes y después de esa fecha, se han usado distintos términos equivalentes a este concepto: capacidad técnica de trabajo,

disponibilidad, energía disponible, trabajo disponible, trabajo potencial, energía útil, esergía o energía esencial, entropía potencial. Los primeros escritos sobre el concepto de energía disponible se atribuyen a J. W. Gibbs en 1873 (Ayres et al., 1996, Sciubba and Wall, 2007).

Antes de 1950 era casi inexistente la literatura sobre exergía (Wall, 1992). Así por ejemplo, el libro Textbook of PhysicalChemistry (Glasstone, 1946) no hace mención del término. Quince años después, la primera edición del libro Fundamentals of Classical Thermodynamics (Wylen and Sonntag, 1965) dedica un capítulo al tema "Irreversibilidad y disponibilidad", siendo este último término un sinónimo de la exergía.

La exergía es una propiedad de los sistemas termodinámicos que permite incluir el entorno en los cálculos; se puede considerar como una medida de la "calidad" de la energía disponible y surge del análisis de un proceso con base en las dos primeras leyes de la Termodinámica. Una de sus posibles definiciones es:
La cantidad de trabajo obtenible cuando alguna materia se lleva a un estado de equilibrio termodinámico con los componentes comunes del entorno natural por medio de procesos reversibles. (Szargut et al., 1988).

Otra definición afirma que "es trabajo o la habilidad de producir trabajo" (Dincer and Cengel, 2001). El estado final se conoce como estado muerto.

El análisis exergético ha sido aplicado principalmente en los procesos de generación de potencia (turbinas y motores), propios de la ingeniería mecánica, dado que la existencia de tablas de propiedades termodinámicas para diferentes fluidos facilitan el cálculo de los cambios de exergía (Wylen and Sonntag, 1965, Wall, 1992). Sin embargo, la exergía también se ha aplicado en el campo de la ingeniería química; por ejemplo: el análisis de procesos industriales, el diseño de procesos de destilación y desalinización y el diseño de redes de intercambiadores de calor. Actualmente, la

aplicación del concepto de la exergía se está extendiendo a otros campos, como la ecología industrial y el diseño arquitectónico.

Para un sistema que se transporta a una velocidad V la energía es igual a su exergía en un proceso ideal en el que no interviene ninguna otra fuerza como la fricción. En el caso de la energía que tiene un sistema que se encuentra en un campo gravitacional, la energía potencial es igual a su exergía en un sistema ideal.

La energía eléctrica y el trabajo mecánico son flujos de exergía, en un proceso ideal se puede convertir todo el trabajo en energía eléctrica y viceversa. La energía química no se puede transformar totalmente a trabajo mecánico. El máximo trabajo que se puede extraer de un sistema químico compuesto de una sustancio pura depende de la entalpia de formación, de su concentración y del estado de referencia del ambiente. El trabajo máximo trabajo útil que se obtiene de un flujo de calor es una porción que depende de la temperatura del sistema (Tq) y la temperatura de referencia (T_0) (Tabla 1.1)

Tabla 1.1. Exergía específica contenida en diferentes flujos de energía (Rojas, 2015)

Exergía específica contenida en diferentes flujos de energía		
Tipo de flujo de energía	Energía específica	Exergía específica
Cinética	0.5V^2	0.5V^2
Potencial	gΔZ	gΔZ
Calor	q	q(1-tq/t0)
Mecánica	w	w
Eléctrica	ItΔV	ItΔV
Química	ΔgG	μ-μ0 +RT0Ln(C/Co)

1.2.2 Rendimiento exergético

La utilidad de la energía contenida en un sistema se describe mediante la exergía. Dado que técnicamente lo que interesa de un sistema es su capacidad para producir

trabajo, resulta mucho más lógico desde un punto de vista económico, calcular los rendimientos exergéticos en lugar de losenergéticos.

ηexergético= Exergía obtenida / Exergía suministrada

El concepto de exergía incluye por un lado el hecho de que dos energías iguales pueden producir trabajos diferentes y además al incluir el término entrópico tiene en cuenta la irreversibilidad del proceso (Rojas, 2015).

La aplicación del rendimiento exergético a procesos necesita una definición previa de los recursos, productos y residuos que están involucrados en el mismo, lo que implica juicios de valor económico. En función de esta clasificación de los flujos, el rendimiento exergético del proceso tomará distintos valores.

1.2.3 Consideraciones termodinámicas

Es importante destacar que la exergía es una función que depende del estado del sistema y del ambiente. Por tanto su valor deja de depender en exclusiva del sistema, dependiendo además del entorno. Será necesario crear un estado al que se referirán todos los cálculos, este estado recibe el nombre de estado muerto. El empleo de este estado estable de referencia llamado estado muerto, permite tratar a la exergía como si fuera una función de estado (Szargut et al., 1988).
La exergía del estado muerto es nula, esto es consistente con la definición que anteriormente se ha dado de estado muerto. Todo sistema cerrado en un estado de equilibrio, que no sea el estado muerto, tiene capacidad para realizar trabajo útil sobre su entorno (Regueral, 2003).

1.3 Investigaciones precedentes relacionadas

Por la importancia que tiene para el país el constante perfeccionamiento de los grupos electrógenos, la Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas ha aportado

varios trabajos de diplomas referidos a este ámbito, entre ellos los que se relacionan directamente con el tema son los mencionados a continuación.

En el año 2013, Pedro Julio Batista Martínezcon su tesis: “Técnicas de diagnóstico y fallas en los motores de combustión interna fuel oil de la generación distribuida de electricidad” determinó que los equipos o partes que más fallas presentan son la culata, el múltiple de escape, el gobernador, la camisa, entre otros, y realizó un análisis de confiabilidad de estos equipos en las centrales Santa Clara 110 y Santa Clara Industrial, y por último se utilizó el sistema de control y seguimiento de fallas el estudio de un número de fallas asignadas (Martínez, 2013). En ese mismo año Felix González González confecciona su trabajo de diploma: “Potenciales de cogeneración en la central de grupos electrógenos de fuel oil (GEF) de Cayo Santa María” donde se determinan los potenciales de cogeneración de los motores MAN de dicha central, se establecen alternativas para el suministro de los productos de la cogeneración, se realiza una estimación de las curvas de explotación de los motores MAN así como se determina el factor de carga y de servicio a los cuales trabajan, se establece un modelo matemáticos del conjunto motor – caldera recuperativa – sistema de refrigeración por absorción, el cual mediante el software Engineering Equation Solver es utilizado para determinar la capacidad de producción de vapor y o frío de los motores MAN yse realiza también un balance de energía y de exergía en el sistema (González, 2013).

En el año 2007Alfredo Norlyn Jorge Rouco realiza un análisis de la red de 110/33 kV de Villa Clara con el objetivo de estudiar el funcionamiento adecuado del sistema de Generación Distribuida para que se opere con la disponibilidad óptima. Esta integración se realizó utilizando el software PSX Profesional, y permite reducir significativamente los índices de consumo de combustible por kW*h generado, dejándolo plasmadoen su tesis “Estudio de la operación óptima de la generación con fuel oil y diésel en Villa Clara”(Rouco, 2007).

En el 2017 se realizó un estudio de la central Santa Clara 110 kV con vistas a identificar potencialidades para la cogeneración. Se estableció una Metodología para el balance térmico del motor Himsen Hyundai 1,7 MW y caldera recuperativa, identificando potenciales de calor producto de la combustión, además se realizó un balance exergético para determinar que parte de ese calor se encuentra disponible para la cogeneración (Delgado, 2017), También en el 2017 se crea un novedoso procedimiento para la operación del grupo electrógeno y la concepción de nuevas interfaces gráficas de usuario del SCADA, lográndose funcionalidades adicionales que permiten realizar una mejor gestión del mismo (Armas, 2017) y en este mismo año Lázaro Adrian Concepción Acosta se apoya del Matlab para realizar un resumen del cálculo térmico, balance térmico y trazado de curva de MCI, describiendo así la explotación actual y futura de la Central Eléctrica UEB Cayo Santa María con motores de combustión interna de fuel oil y analizando los principales parámetros de explotación de estos motores, análogo a este estudio se realiza el trabajo de diploma de Carlos Alberto Iglesias Arteaga que analiza la misma central pero con motores de combustión interna utilizando diésel, y añade al estudio un balance energético y exergético, apoyándose también en MATLAB (Acosta, 2017).

Capítulo 2: Desarrollo de los cálculos en el grupo electrógeno objeto de estudio

2.1 Caracterización del grupo electrógeno Santa Clara Industrial

El Emplazamiento de Grupo Electrógeno de Fueloil Santa Clara Industrial pertenece a la Unidad Empresarial de Base (UEB) Generación Distribuida de la Empresa Eléctrica de Villa Clara, perteneciente al Ministerio de Industria y Energía (MINEN). Se encuentra ubicada en la Carretera Circunvalación Sur, banda Placetas, km ½ al matadero de aves, Callejón del Guacalote. Reparto Lizardo Proenza. Municipio de Santa Clara, provincia de Villa Clara. Su constante crecimiento va encaminado a la necesidad de satisfacer las necesidades de generación eléctrica para el Sistema Eléctrico Nacional (SEN), según necesidades a partir de la utilización del fueloil como combustible, de forma tal que permita al país un mayor abastecimiento y servicio para y con la comunidad.

2.1.1. Capacidad instalada.

Desde sus inicios se comenzó con una sala de máquinas de generación eléctrica que cuenta con 12 motores de fabricación coreana marca Hyundai Himsen, los cuales resultan eficientes para el aumento de confiabilidad al sistema.

Utiliza como tecnología más eficiente el uso del combustible fueloil, que es más económico que la generación con diesel. En la actualidad se cuenta con 12 motores de 1.7 MW cada uno, los cuales conforman tres baterías (con cuatro motores cada una) para un total de 20.4 MW. Hoy en día, se trabaja para un régimen de operación al 85 % de la potencia instalada lo cual significa 16.8 MW del total, respondiendo así a las exigencias demandadas por el Sistema Nacional.

2.1.2. Descripción de los motores Hyundai, 1.7 MW

Los grupos electrógenos de fueloil están diseñados para suministrar energía eléctrica al sistema eléctrico nacional, alimentándolo parcialmente o entregando toda la energía a la red nacional, realizan dicha función utilizando, entre otros componentes,

los grupos motor-generador, son del tipo HIMSEN HYUNDAI y modelo 9H21/32S de 27,32 ton de peso Fig.2.1.

Fig.2.1. Motor HIMSEN HYUNDAI modelo 9H21/32S

El nombre HIMSEN significa “Motor de Velocidad Media de Alta Tecnología” y que corresponde a la fábrica que diseñó este motor, perteneciente a la compañía HYUNDAI. La designación del modelo 9H21/32S nos brinda sucesivamente mediante sus letras y números información, por ejemplo posee 9 cilindros, pertenece a la compañía HYUNDAI, el diámetro de los cilindros es 21 cm, la carrera del pistón es 32 cm y que es un motor estacionario. Cuentan con un diseño contenedorizado, son capaces de trabajar a una temperatura que oscila entre -54^0C y 45^0C. En Cuba estos motores laboran a una temperatura promedio de 32^0C y a una humedad promedio del 80 %.

En cuanto a las características principales de este motor se puede afirmar que su potencia de salida es de 1800 kW y su velocidad nominal es de 900 rpm. Puede trabajar sin ningún tipo de problema con combustible diesel y también con uno pesado de hasta 700 cSt de viscosidad a 50^0C de temperatura. Son altamente económicos y ecológicos debido a que tienen una alta relación de carrera contra diámetro del cilindro, una alta relación de compresión y una alta presión de inyección de combustible. Este motor posee una estructura simple y robusta en cuanto a número de componentes del motor y al acceso fácil y directo a los dispositivos para el mantenimiento. Su sistema de alimentación es completamente modularizado con accesibilidad directa.

En las tablas 2.1 y 2.2 se dan los principales parámetros de la tecnología Hyundai. La tecnología Hyundai que se ha instalado en la planta es de primera mano, por lo que la observación de los parámetros de funcionamiento deberá ser más estricta. No obstante en la planta se pudo constatar una alta disciplina tecnológica.

Tabla 2.1: Principales características de las unidades de generación Hyundai.

Equipo	**Características**	**Especificaciones**
Himsen Hyundai	Tipo de Motor	Himsen Hyundai /9H21
	Diámetro interior	210 mm
	Carrera del pistón	320 mm
	Diámetro del pistón por cilindro	210 mm
	Velocidad media del pistón	9,6 m/s
	Peso total del motor Longitud del motor	50 ton 2,4x3,4x12 m
	Consumo de combustible	210 g/kW*h
	Potencia.	1700 kW
	Tiempo de mantenimiento	12000 h
	Frecuencia	60 Hz

Tabla 2.2: Parámetros principales del motor Hyundai 9H21/32S

Motor Himsen Hyundai	
Pot. Activa por cilindro	50-100KW
Veloc. Turbo.	< 40920 rpm
Veloc. Motor.	891-909 rpm
Combustible.	
Presión.	7,0 – 10 bar
Temperatura.	110 - 149°C
Aceite lubricación	
Nivel de aceite en el cárter	50 – 75%
Temperatura.	60 - 73°C
Presión de aceite a la entrada del motor.	4 – 5 bar
Presión a la entrada del filtro.	5,0 – 6,0 bar
Temperatura del aire.	
Temperatura del aire dentro del contenedor	30 - 45°C
Temperatura del aire de carga	35 - 55°C
Presión de sistemas de aire.	
Presión de aire de carga.	1,0 – 3,2 bar
Presión de arranque.	20 – 30 bar
Presión de aire en las válvulas de emergencia.	7,0 – 8,0 bar.
Presión de aire en las válvulas de cambio de combustible.	7,0 – 8,0 bar.
Sistema de agua de enfriamiento.	
Presión de agua a la entrada del radiador.	0,7 - 09 bar
Presión de agua a baja temperatura.	0,1 – 0,3 bar
Presión de agua a alta temperatura.	2,5 – 4,5 bar
Temperatura de agua a la entrada al enfriador del aire de carga.	30 - 40 °C
Temperatura de agua al la entrada del enfriador de aceite.	40 - 50°C
Temperatura del agua a la entrada de la camisa.	75 - 78°C
Temperatura del agua a la salida de la camisa.	77 - 87°C
Temperatura del sistema de gases	

Temperatura de los cilindros.	250 - 390°C
Temperatura a la entrada del turbo.	450 - 520°C
Temperatura a la salida del turbo.	250 - 380°C
Presión.	
Presión de aceite del sistema de enfriamiento	-5bar

2.2 Modelo general diseñado para el cálculo de optimización de la distribución de cargas en los motores de un emplazamiento de grupos electrógenos

Teniendo como datos la ecuación de carga (potencia) “x” vs consumo específico “y” de n motores se obtienen n ecuaciones de segundo grado ax^2+bx+c siendo:

$a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ los coeficientes cuadráticos

$b_1, b_2, b_3, \dots, b_n$ los coeficientes lineales

$c_1, c_2, c_3, \dots, c_n$ los términos independientes

para un valor conocido de carga total x_t que se desea que el sistema entregue y valores óptimos desconocidos $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ se cumple que:

$$x_t = x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n \quad (2.1)$$

Teniendo en cuenta la ley de conservación de la masa, el flujo másico total de combustible es igual a la sumatoria del flujo másico de combustible en cada motor; por tanto se puede decir que:

$$y_t x_t = y_1 x_1 + y_2 x_2 + y_3 x_3 + \dots + y_n x_n \quad (2.2)$$

Despejando y_t:

$$y_t = \frac{y_1x_1+y_2x_2+y_3\,x_3\ +\ldots+y_n\ x_n}{x_t} \tag{2.3}$$

Se deduce que:

$$y_t = \frac{(a_1x_1^2+b_1x_1+c_1)x_1+(a_2x_2^2+b_2x_2+c_2)x_2+(a_3x_3^2+b_3x_3+c_3)\,x_3\ +\ldots+(\ a_nx_n^2+b_nx_n+c_n)\ x_n}{x_t} \tag{2.4}$$

Despejando cualquier término de la ecuación 2.2 se obtiene:

$$x_n = x_t - (\ x_1+x_2+x_3+\ldots+x_{n-1}\ ) \tag{2.5}$$

y sustituyendo x_n en la ecuación 2.4 se obtiene:

$$y_t = \frac{(a_1x_1^2+b_1x_1+c_1)x_1+(a_2x_2^2+b_2x_2+c_2)x_2+(a_3x_3^2+b_3x_3+c_3)x_3\ +\ldots+\left[a_n(x_t-(x_1+x_2+x_3+\cdots+x_{n-1}))^2+b_n(x_t-(x_1+x_2+x_3+\cdots+x_{n-1}))+c_n\right]\ [x_t-(x_1+x_2+x_3+\cdots+x_{n-1})]}{x_t} \tag{2.6}$$

se calcula el vector gradiente

$$\nabla y_t(x_1,x_2,x_3,\ldots,x_{n-1}) = \left(\frac{\partial y_t}{\partial x_1},\frac{\partial y_t}{\partial x_2},\frac{\partial y_t}{\partial x_3},\ldots,\frac{\partial y_t}{\partial x_{n-1}}\right) \tag{2.7}$$

Se iguala a cero y se resuelve la ecuación resultante, luego se desarrolla el binomio de Newton, se obtienen los candidatos y se sustituyen en el Hessiano:

$$H(y_t) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 y_t}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2 y_t}{\partial x_1 \partial x_2} & \frac{\partial^2 y_t}{\partial x_1 \partial x_3} & \cdots & \frac{\partial^2 y_t}{\partial x_1 \partial x_{n-1}} \\ \frac{\partial^2 y_t}{\partial x_2 \partial x_1} & \frac{\partial^2 y_t}{\partial x_2^2} & \frac{\partial^2 y_t}{\partial x_2 \partial x_3} & \cdots & \frac{\partial^2 y_t}{\partial x_2 \partial x_{n-1}} \\ \frac{\partial^2 y_t}{\partial x_3 \partial x_1} & \frac{\partial^2 y_t}{\partial x_3 \partial x_2} & \frac{\partial^2 y_t}{\partial x_3^2} & \cdots & \frac{\partial^2 y_t}{\partial x_1 \partial x_{n-1}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 y_t}{\partial x_{n-1} \partial x_1} & \frac{\partial^2 y_t}{\partial x_{n-1} \partial x_2} & \frac{\partial^2 y_t}{\partial x_{n-1} \partial x_3} & \cdots & \frac{\partial^2 y_t}{\partial x_{n-1}^2} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Mediante esta metodología se calculan los valores donde se optimiza la ecuación, siendo estos los que aseguran un consumo específico mínimo en la instalación.

2.3 Optimización de la distribución de cargas en los motores del emplazamiento objeto de estudio

2.3.1 Datos de Partida

A partir de una ecuación modelo característica de un motor en perfecto estado se elaboran 12 ecuaciones con variaciones en los parámetros, simulando así una diferencia en el estado técnico de los motores donde el motor más crítico presenta un mínimo consumo específico trabajando a 72 % de carga. Las ecuaciones correspondientes a los 12 motores son las siguientes:

$y_1 = 0.005{x_1}^2 - 0.834x_1 + 248$

$y_2 = 0.0045{x_2}^2 - 0.767x_2 + 238$

$y_3 = 0.0052{x_3}^2 - 0.863x_3 + 220$

$y_4 = 0.005{x_4}^2 - 0.729x_4 + 228$

$y_5 = 0.004{x_5}^2 - 0.588x_5 + 248$

$y_6 = 0.0043{x_6}^2 - 0.657x_6 + 248$

$y_7 = 0.006{x_7}^2 - 0.869x_7 + 267$

$y_8 = 0.005{x_8}^2 - 0.793x_8 + 233$

$$y_9 = 0.005{x_9}^2 - 0.824x_9 + 249$$
$$y_{10} = 0.0051{x_{10}}^2 - 0.791x_{10} + 248$$
$$y_{11} = 0.005{x_{11}}^2 - 0.871x_{11} + 248$$
$$y_{12} = 0.0035{x_{12}}^2 - 0.600x_{12} + 244$$

2.3.2 Valores óptimos de cada motor

Primero se analiza cada ecuación de manera individual para obtener el consumo específico óptimo de cada motor, esto se puede lograr solamente calculando el valor mínimo de cada función por la metodología clásica para calcular el valor mínimo de una función cuadrática, es decir, para la ecuación que corresponde al motor 1 el consumo específico mínimo se alcanza al 83.4 % entregando una potencia de 1.4178 MW, sustituyendo x_1 en la ecuación se obtiene que el mínimo consumo específico de combustible que se puede obtener del motor 1 es de 213.22 g/kWh.
De igual manera se realizan los cálculos para los demás motores, obteniendo así los siguientes resultados mostrados en la tabla 2.3:

Tabla 2.3. Valores óptimos de consumo específico, potencia y porciento de carga de cada motor independiente

	SFC mínimo(g/kWh)	Potencia (MW)	%
Motor 1	213.222	1.4178	83.4
Motor 2	205.317	1.44878	85.2223
Motor 3	184.194	1.41067	82.9808
Motor 4	201.428	1.2393	72.9
Motor 5	226.392	1.2495	73.5
Motor 6	222.904	1.29872	76.3954

Motor 7	235.535	1.23108	72.4167
Motor 8	201.558	1.3481	79.3
Motor 9	215.051	1.4008	82.4
Motor 10	217.329	1.31833	77.549
Motor 11	210.068	1.4807	87.1
Motor 12	218.286	1.45714	85.7143

2.3.3 Valores óptimos de cada motor para una potencia total asignada

Para calcular la optimización general se necesita saber la potencia que decida el despacho de carga que es la que debe entregar el emplazamiento en dependencia de las exigencias de la Unión Nacional Eléctrica. Se selecciona la potencia que entregarían de manera óptima los motores si estuvieran todos en buen estado, es decir según las recomendaciones del fabricante este punto se logra para el 85 % de carga con una magnitud de 1.445 MW para cada motor, obteniendo un total de 17.34 MW. Esta potencia tiene que ser igual a la suma de todas las potencias óptimas generadas por cada motor:

$x_t = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 + x_8 + x_9 + x_{10} + x_{11} + x_{12}$

También se conoce que el consumo específico total depende del consumo específico de cada motor de la siguiente forma:

$$y_t = \frac{y_1x_1 + y_2x_2 + y_3x_3 + y_4x_4 + y_5x_5 + y_6x_6 + y_7x_7 + y_8x_8 + + y_9x_9 + y_{10}x_{10} + y_{11}x_{11} + y_{12}x_{12}}{x_t}$$

Sustituyendo las ecuaciones seleccionadas para cada y_n se obtiene:

$$y = [x_1(0.005{x_1}^2 - 0.834x_1 + 248) + x_2(0.0045{x_2}^2 - 0.767x_2 + 238) + x_3(0.0052{x_3}^2 - 0.863x_3 + 220) + x_4(0.005{x_4}^2 - 0.729x_4 + 228) + x_5(0.004{x_5}^2 - 0.588x_5 + 248) + x_6(0.0043{x_6}^2 - 0.657x_6 + 248) + x_7(0.006{x_7}^2 - 0.869x_7 + 267) + x_8(0.005{x_8}^2 - 0.793x_8 + 233) + x_9(0.005{x_9}^2 - 0.824x_9 + 249) + x_{10}(0.0051{x_{10}}^2 - 0.791x_{10} + 248) + x_{11}(0.005{x_{11}}^2 - 0.871x_{11} + 248) + x_{12}(0.0035{x_{12}}^2 - 0.600x_{12} + 244)]/x_t$$

siendo x_t=17.34 MW la potencia total deseada:

$$17.34= x_1+x_2+x_3+x_4+x_5+x_6+x_7+x_8+x_9+x_{10}+x_{11}+x_{12}$$

Despejando x_{12} sería: $x_{12}= 17.34-(x_1+x_2+x_3+x_4+x_5+x_6+x_7+x_8+x_9+x_{10}+x_{11})$

y sustituyendo x_{12} en la función a optimizar se obtiene:

$$y = \{x_1(0.005{x_1}^2 - 0.834x_1 + 248) + x_2(0.0045{x_2}^2 - 0.767x_2 + 238) + x_3(0.0052{x_3}^2 - 0.863x_3 + 220) + x_4(0.005{x_4}^2 - 0.729x_4 + 228) + x_5(0.004{x_5}^2 - 0.588x_5 + 248) + x_6(0.0043{x_6}^2 - 0.657x_6 + 248) + x_7(0.006{x_7}^2 - 0.869x_7 + 267) + x_8(0.005{x_8}^2 - 0.793x_8 + 233) + x_9(0.005{x_9}^2 - 0.824x_9 + 249) + x_{10}(0.0051{x_{10}}^2 - 0.791x_{10} + 248) + x_{11}(0.005{x_{11}}^2 - 0.871x_{11} + 248) + [17.34 - (x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 + x_8 + x_9 + x_{10} + x_{11})] * [0.0035[17.34 - (x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 + x_8 + x_9 + x_{10} + x_{11})]^2 - 0.600[17.34 - (x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 + x_8 + x_9 + x_{10} + x_{11})] + 244]\}/17.34$$

Luego se calcula el vector gradiente:

$$\nabla y_t(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}) = \left(\frac{\partial y_t}{\partial x_1}, \frac{\partial y_t}{\partial x_2}, \frac{\partial y_t}{\partial x_3}, \frac{\partial y_t}{\partial x_4}, \frac{\partial y_t}{\partial x_5}, \frac{\partial y_t}{\partial x_6}\frac{\partial y_t}{\partial x_7}, \frac{\partial y_t}{\partial x_8}, \frac{\partial y_t}{\partial x_9}\frac{\partial y_t}{\partial x_{10}}, \frac{\partial y_t}{\partial x_{11}}, \right)$$

Se iguala a cero y se resuelve la ecuación resultante, luego se desarrolla el binomio de Newton, se obtienen los candidatos y se sustituyen en el Hessiano:

$$H(y_t) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 y_t}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2 y_t}{\partial x_1 \partial x_2} & \frac{\partial^2 y_t}{\partial x_1 \partial x_3} & \cdots & \frac{\partial^2 y_t}{\partial x_1 \partial x_{11}} \\ \frac{\partial^2 y_t}{\partial x_2 \partial x_1} & \frac{\partial^2 y_t}{\partial x_2^2} & \frac{\partial^2 y_t}{\partial x_2 \partial x_3} & \cdots & \frac{\partial^2 y_t}{\partial x_2 \partial x_{11}} \\ \frac{\partial^2 y_t}{\partial x_3 \partial x_1} & \frac{\partial^2 y_t}{\partial x_3 \partial x_2} & \frac{\partial^2 y_t}{\partial x_3^2} & \cdots & \frac{\partial^2 y_t}{\partial x_1 \partial x_{11}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 y_t}{\partial x_{11} \partial x_1} & \frac{\partial^2 y_t}{\partial x_{11} \partial x_2} & \frac{\partial^2 y_t}{\partial x_{11} \partial x_3} & \cdots & \frac{\partial^2 y_t}{\partial x_{11}^2} \end{bmatrix}$$

Obteniendo de esta manera los datos mostrados en la tabla siguiente:

Tabla 2.4. Valores óptimos de consumo específico, potencia y porciento de carga de cada motor funcionando en conjunto para una potencia total asignada

	SFC mínimo(g/kWh)	Potencia (MW)	%
Motor 1	213.338	1.49944	88.2023
Motor 2	205.445	1.53949	90.5581
Motor 3	184.305	1.48917	87.5983
Motor 4	201.543	1.32094	77.7022
Motor 5	226.535	1.35155	79.5029
Motor 6	223.038	1.39365	81.9793
Motor 7	235.631	1.29912	76.4186
Motor 8	201.673	1.42974	84.1022
Motor 9	215.167	1.48244	87.2023
Motor 10	217.442	1.39837	82.2571
Motor 11	210.183	1.56234	91.9022
Motor 12	218.45	1.57377	92.5747

Si se desea saber el consumo específico del sistema en general se debe partir de la ecuación:

$$y_t = \frac{y_1x_1 + y_2x_2 + y_3\,x_3 \;+ y_4x_4 + y_5x_5 + y_6x_6 + y_7x_7 + y_8x_8 + +y_9x_9 + y_{10}x_{10} + y_{11}x_{11} + y_{12}x_{12}}{x_t}$$

Siendo “x” cada potencia óptima, y “y” cada consumo específico se obtiene que el consumo específico óptimo del sistema es de 212.429 g/kWh.

2.3.4 Análisis de resultados

La Fig.2.2 muestra la distribución de carga óptima de cada motor, para el sistema con una potencia total entregada de 17.34 MW, y muestra también la carga óptima de cada motor de manera independiente, como la potencia total entregada es mayor que la potencia total que entregaría el sistema suponiendo que todos sus motores entregaran su potencia óptima independiente, El modelo aumenta cada potencia óptima de cada motor independiente hasta sumar 17.34 MW,

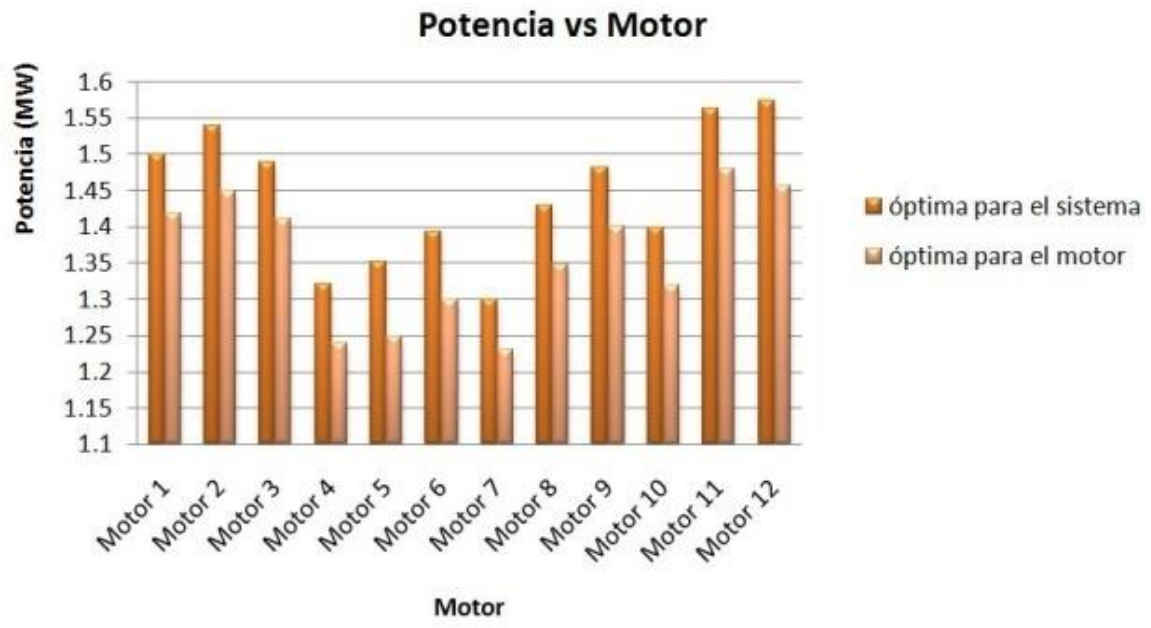

Fig. 2.2. Gráfica de Potencia entregada óptima para el sistema y óptima para el motor vs Motor

La peculiaridad de este modelo es que tiene en cuenta el gradiente por lo que considera la dirección en la cual el campo vectorial de la función varía más rápidamente, de esta forma tiene sentido que las 2 distribuciones de cargas no sean exactamente equidistante, sino que presentan una variación según muestra la Fig.2.3.

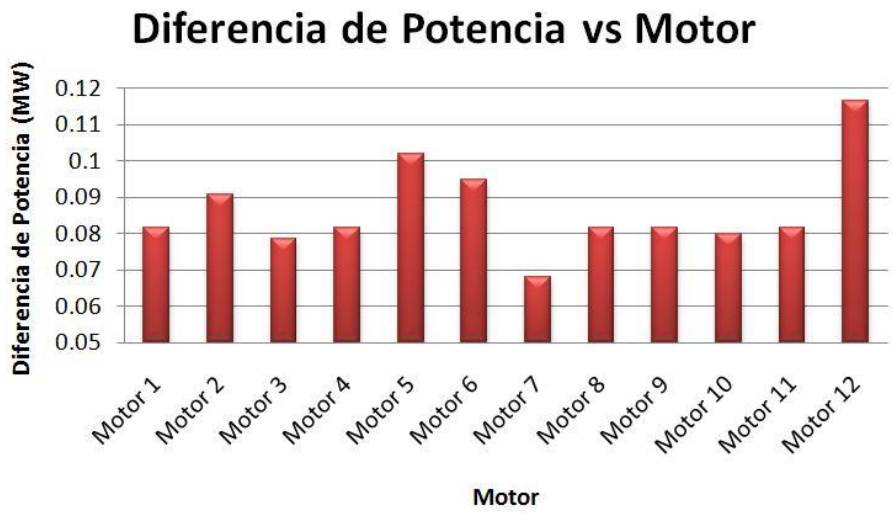

Fig.2.3. Comportamiento de la diferencia de potencia en cada motor

2.4 Cálculo exergético

Para el desarrollo de los cálculos exergéticos se analiza el sistema suponiendo que se mantuvo entregando 17.34 MW todo el año, primero se analiza con una distribución de cargas igual para cada motor y luego se analiza con la distribución óptima de cargas mostrada en el epígrafe anterior, esto con el objetivo de establecer comparaciones de los resultados en términos exergoeconómicos. Es necesario aclarar que en el emplazamiento en ocasiones se utiliza como combustible el diésel por fallos ocurridos en la depuradora, no obstante como que el consumo de Diesel solo representa el 7 % del consumo total, se considera todo el combustible utilizado como fueloil, ya que esto no afecta considerablemente a los cálculos debido a que las propiedades de ambos combustible no tienen una diferencia significativa.

2.4.1 Datos de partida

Primeramente se realiza la metodología para una distribución de cargas igual en cada motor y se parte de los siguientes datos:

Como se demostró en el epígrafe anterior el consumo específico es de 212.863 g/kWh, suponiendo que la potencia entregada es de 17.34 MW, para calcular la producción de energía en kWh se parte de la siguiente ecuación:

$$P(kWh) = P(MW) * \frac{1000(kW)}{1(MW)} * 8760(h)$$

$$P(kWh) = 17.34\ \cancel{MW} * \frac{1000\ kW}{1\ \cancel{MW}} * 8760\ h$$

$$P = 151898400\ kWh$$

Para calcular el consumo de combustible en kg se analiza:

$$Consumo\ (kg) = Consumo_{esp}\left(\frac{g}{kWh}\right) * P\ (kWh) * \frac{1(kg)}{1000\ (g)}$$

$$Consumo\ (kg) = 212.863\ \frac{\cancel{g}}{\cancel{kWh}}\ * 151898400\ \cancel{kWh} * \frac{1kg}{1000\ \cancel{g}}$$

$$Consumo\ = 32333549.12\ kg$$

2.4.2 Balance exergético

-El Poder Calórico Superior promedio es de 43000 kJ/kg este valor es necesario para calcular la exergía del Fuel-Oil, este valor es aproximado y se utiliza como la exergía química de dicho combustible, el método más exacto sería calcular la exergía de acuerdo a la composición química del Fuel-Oil, se decide este valor de PCS para simplificar los cálculos.

Para expresar la exergía del combustible que se consume en el año (Bentra):

$$\text{Bentra} = PCS * Consumo$$

$$\text{Bentra} = 43000\ kJ/\cancel{kg} * 32333549.12\ \cancel{kg}$$

Bentra=1.390*10^{12} kJ

Por lo tanto esta es la exergía del combustible empleado en todo el año.

La exergía del producto (Butil_sale) sería la producción de energía eléctrica en el año (PEE).

PEE= Butil_sale=151898400 kWh

Convirtiéndolo a kJ se multiplica por 3600

Butil_sale=$5.468*10^{11}$ kJ

Para calcular las irreversibilidades totales (I):

I= Bentra - B_útil_sale =$1.390*10^{12}$ kJ - $5.468*10^{11}$ kJ

I=$8.435*10^{11}$ kJ

Esta irreversibilidad sería la suma D+L, es decir, la destrucción de la exergía y las perdidas, se hace necesario aclarar que para este caso se considera como exergía útil sólo la exergía que se vende a la empresa eléctrica, sin embargo si se cambia el volumen de control y se analiza teniendo en cuenta un sistema de cogeneración donde se aproveche la exergía de los gases de escape, parte de esas pérdidas (L) pasarían a sumar a la exergía útil.

Estimación de la Eficiencia Exergética (N):

N= (B_útil_sale/ Bentra)*100

N=($5.468*10^{11}$ /$1.390*10^{12}$)*100

N=39.3 %

Cuando se expresa que la eficiencia exergética del grupo electrógeno es de 39.3 % lo que se traduce que sólo el 39.3 % del combustible pasa al producto en el proceso tecnológico.

Estimación del costo exergético unitario (K)

K=1/N

K=1/0.393

K=2.545

El costo exergético unitario se interpreta como que se necesitan 2. 545 unidades de exergía del Fuel para producir una unidad en el producto.

2.4.3 Impacto económico

Costo del consumo de combustible total (Cf)

Para calcular el Costo del consumo de combustible total se necesita saber el precio del combustible que es 0.9 CUC/l y la densidad se considera como promedio 0.96 kg/l

$$Cf(CUC) = Precio_{combustible}\left(\frac{CUC}{\cancel{l}}\right) * \frac{consumo(\cancel{kg})}{densidad(\frac{\cancel{kg}}{\cancel{l}})}$$

$$Cf(CUC) = 0.9\frac{CUC}{\cancel{l}} * \frac{32333549.12\,\cancel{kg}}{0.96\,\frac{\cancel{kg}}{\cancel{l}}}$$

$$Cf = 0.9\frac{CUC}{\cancel{l}} * \frac{32333549.12\,\cancel{kg}}{0.96\,\frac{\cancel{kg}}{\cancel{l}}}$$

Cf=3.03*10^7 CUC este es el valor del combustible que emplea el grupo electrógeno

Costos asociados (Z)

Para calcular los costos asociados se analizaron siguientes elementos:

-Costo capital de la instalación: No se tuvo en cuenta, se consideró que ya se despreció el valor total

-Costo por salario: Cs=100000 CUC

-Costos por mantenimiento: CM=4000 CUC

-Costo de explotación: No se tuvo en cuenta

-Otros Gastos: No se tuvo en cuenta

$$\mathrm{Z} = Cs + CM = 100000\ CUC + 4000\ CUC = 104000\ CUC$$

Costo exergoeconómico unitario del producto (Ce)

$$Ce\ \left(\frac{CUC}{kWh}\right) = \frac{Cfuel\ (CUC) + Z(CUC)}{Bútil_sale\ (kWh)}$$

$$Ce\ \left(\frac{CUC}{kWh}\right) = \frac{3.03 * 10^7\ \mathrm{CUC} + 104000\ CUC}{151898400\ kWh}$$

$$Ce\ = 0.20 \frac{CUC}{kWh}$$

Siguiendo esta misma metodología se realizaron los cálculos para el consumo óptimo propuesto en el epígrafe anterior, los datos y los resultados de ambos análisis se incluyen en la siguiente tabla comparativa:

Tabla 2.5: Comparación de las variables para el análisis exergoeconómico sin optimizar y optimizado

		Sin optimizar	optimizado
Datos	Consumo (kg)	32333549.12	32267625.21
	Poder Calórico Superior (kJ/kg)	43000	43000
	Producción de Energía Eléctrica (kWh)	151898400	151898400
	Densidad (kg/l)	0.96	0.96
	Precio del combustible (CUC/l)	0.9	0.9
	Salario Anual (CUC)	100000	100000
	Mantenimiento Anual (CUC)	4000	4000
Resultados	B entra (kJ)	$1.390*10^{12}$	$1.388*10^{12}$
	B útil sale (kJ)	$5.468*10^{11}$	$5.468*10^{11}$
	Irreversibilidad (kJ)	$8.435*10^{11}$	$8.407*10^{11}$
	Eficiencia Exergética (%)	39.3	39.4
	Costo exergético unitario	2.54	2.53
	Valor del combustible (CUC)	$3.03*10^{7}$	$3.025*10^{7}$
	Costos asociados (CUC)	104000	104000
	Costo exergoeconómico unitario (CUC/kWh)	0.200	0.199

Si la distribución de carga se realiza de una manera diferente a la óptima, obviamente el consumo específico del sistema es mayor, por ejemplo si se distribuye la potencia total de 17.34 MW en cada motor de forma equitativa, cada motor entrega 1.445 MW (17.34 MW/12 motores) al 85 % con un consumo específico de 212.863 g/kWh, desperdiciando 0.434 g/kWh, si estos parámetros no varían en el transcurso de una hora, el sistema entrega 17340 kWh desperdiciando 7525.56 g de combustible, para un precio de 0.93 CUC el kilogramo de fuel, el emplazamiento desperdicia 7 CUC por hora, que se convierten en 168 CUC diario. Referido al costo

exergoeconómico unitario de la energía eléctrica, el modelo sin optimizar lo eleva injustificadamente 0.001 CUC/kWh.

2.4.4 Impacto ambiental

Aunque se prefiere la medición en lugar del cálculo usando factores de emisión, no siempre es posible debido a las limitaciones de recursos, en este caso resulta apropiado el uso de factores de emisión para estimar las tasas de emisión, para ello se toma como referencia la base de datos FIRE de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, 2004), donde además se pueden consultar los diferentes métodos usados para determinarlos.
En la tabla 2.6 se puede apreciar los factores de emisión tomados como referencia representando la fracción de masa del contaminante por masa del combustible.

Tabla 2.6 Factores de emisión

PM_{10}	1.95 g/kg de Fuel-Oil
SO_2	4 g/kg de Fuel-Oil
NO_x	21 g/kg de Fuel-Oil
CO	12 g/kg de Fuel-Oil
CO_2	3.1 kg/kg de Fuel-Oil

Analizando estos factores para el consumo específico de combustible de 212.863 g/kWh calculado anteriormente sin optimizar la distribución de carga de los motores, si se mantiene constante en el intervalo de un año tomando como datos de partida los mismos del epígrafe anterior se obtienen los datos mostrados en la tabla 2.7

Tabla 2.7 Emisión de contaminantes en un año para un consumo de combustible sin optimizar

PM_{10}	63050.42 kg
SO_2	129334.20 kg
NO_x	679004.53 kg
CO	388002.59 kg
CO_2	100234002.3 kg

Mientras que aplicando el modelo de optimización donde el consumo específico es de 212.429 g/kWh las emisiones de contaminantes disminuyen en la medida que se muestran en la tabla 2.8

Tabla 2.8 Emisión de contaminantes en un año para un consumo de combustible optimizado

PM_{10}	62921.87 kg
SO_2	129070.50 kg
NO_x	677620.13 kg
CO	387211.50 kg
CO_2	100029638.2 kg

Calculando el porciento que representa la disminución de las emisiones de contaminantes aplicando el modelo de optimización, se obtiene un decremento de 0.2 % para cada emisión de contaminantes.

Capítulo 3: Creación de un software a través de Matlab como herramienta para facilitar los cálculos

Matlab es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M) Entre sus prestaciones básicas se hallan: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware.

3.1 Matlab y su uso en la ingeniería

La habilidad para usar herramientas tales como MATLAB se convirtió rápidamente en un requisito para muchos puestos de ingeniería. MATLAB es particularmente popular para aplicaciones de ingeniería eléctrica, aunque se usa en todos los campos de la ingeniería y ciencias.

En las disciplinas de ingeniería, ciencias y programación de computadoras, es importante tener un enfoque consistente para resolver los problemas técnicos. El enfoque que se plantea a continuación es útil en cursos tan distintos como química, física, termodinámica y diseño de ingeniería. También se aplica a las ciencias sociales, como economía y sociología. Otros autores quizá formulen sus esquemas de resolución de problemas de forma ligeramente diferente, pero todos tienen el mismo formato básico:

- Plantear el problema: Si no tiene una comprensión clara del problema, es improbable que pueda resolverlo.
- Describir los valores de entrada (conocidos) y las salidas (incógnitas) que se requieren.
- Desarrollar un algoritmo para resolver el problema.
- Resolver el problema.
- Probar la solución: ¿Sus resultados tienen sentido físico? ¿Coinciden con los cálculos de la muestra? ¿La respuesta es la que se pedía en realidad?

Con la ayuda de este algoritmo, y con los conocimientos adquiridos en Matlab, se crea COMGE (por sus siglas Cálculo de Optimización de Motores en Grupos Electrógenos).

3.2 Software COMGE

COMGE Se crea en la herramienta Matlab con interface gráfica de Usuario, GUI (del inglés *graphical user interface)* y posteriormente se procesa el compilador de Matlab para convertir el programa a formato *.exe, de esta manera no se hace necesario tener instalado Matlab en otra computadora para acceder al programa, sólo es necesario tener instalado el MCR (Matlab Component Runtime), este componente viene incluido en la carpeta del software para facilitar dicho proceso.

3.2.1 Página Principal

Al ejecutar el programa se abre una ventana donde el usuario puede seleccionar el módulo de acuerdo a lo que desee calcular, que puede ser “Optimización” para la optimización de distribución de cargas de los motores, o el módulo “AEGE” para realizar el cálculo exergoeconómico, el botón instrucciones abre una ventana de diálogo con las instrucciones básicas para realizar el cálculo, y el botón créditos proporciona información acerca de la creación del programa.

3.2.2 Módulo “Optimización”

3.2.2.1 Datos ingresados

Al seleccionar el modulo Optimización se abre la ventana de cálculos para la optimización de la distribución de cargas de los motores, cada motor está enumerado y al lado se ingresan los coeficientes a, b y c correspondientes a cada una de las 12 ecuaciones de consumo específico vs porciento de carga de cada motor. Fig. 3.1,

encima de dicho panel se ingresa el valor de la potencia total deseada en MW y en la parte inferior izquierda de la ventana se ingresa el precio en CUC de un gramo del combustible utilizado.

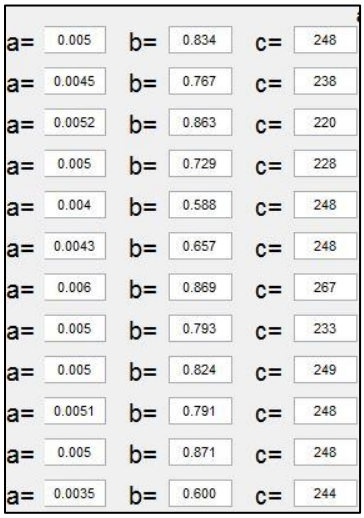

Fig. 3.1 Panel de ingreso de coeficientes a, b y c de cada motor

A la derecha del panel de ingreso de coeficientes a, b y c, el usuario ingresa la distribución de cargas según estime conveniente, esto con el objetivo de establecer una comparación con la distribución óptima que calcule el programa, obviamente la suma de esta distribución de cargas que el usuario ingrese tiene que ser igual a la potencia total deseada.

3.2.2.1 Resultados

El primer resultado objeto de análisis es el mínimo consumo para el motor, ya que expresa una idea de su estado técnico, en este panel se encuentra el SFC (Consumo específico) en g/kWh de cada motor, representando el mínimo consumo específico de cada motor de manera individual, también en este panel se calcula la potencia en MW y el porciento de carga donde ese motor obtiene ese consumo específico Fig. 3.2; estos valores sólo dependen de los coeficientes a, b y c de cada motor, y son el resultado de calcular el punto óptimo en cada uno de los 12 motores.

Mínimo consumo para el motor		
SFC (g/kWh)	Potencia (MW)	%
213.222	1.4178	83.4
205.317	1.44878	85.2223
184.194	1.41067	82.9808
201.428	1.2393	72.9
226.391	1.2495	73.5
222.904	1.29872	76.3954
235.535	1.23108	72.4167
201.558	1.3481	79.3
215.051	1.4008	82.4
217.329	1.31833	77.549
210.068	1.4807	87.1
218.286	1.45714	85.7143

Fig. 3.2. Mínimo consumo para el motor

A la derecha de este panel se encuentran los valores de mínimo consumo para el sistema, que análogo al panel de mínimo consumo para el motor, muestra los valores de SFC, Potencia y porciento de carga, pero para una distribución óptima de cargas de acuerdo a una potencia total deseada Fig.3.3.

Mínimo consumo para el sistema		
SFC (g/kWh)	Potencia (MW)	%
213.338	1.49944	88.2023
205.445	1.53949	90.5581
184.305	1.48917	87.5983
201.543	1.32094	77.7022
226.535	1.35155	79.5029
223.038	1.39365	81.9793
235.631	1.29912	76.4186
201.673	1.42974	84.1022
215.167	1.48244	87.2023
217.442	1.39837	82.2571
210.183	1.56234	91.9022
218.45	1.57377	92.5747

Fig. 3.3. Mínimo consumo para el sistema

En la parte inferior derecha de la ventana se muestran los resultados del consumo específico real, siendo este el calculado de acuerdo a la distribución de cargas realizada por el usuario; el consumo específico óptimo, calculado de acuerdo al punto óptimo de cada motor para el sistema con una potencia total deseada, la diferencia de estos 2 valores y también el capital que se hubiera ahorrado el emplazamiento si hubiera realizado la distribución de manera óptima Fig. 3.4.

SFC real (g/kWh)	212.863		
SFC mínimo (g/kWh)	212.429		
SFC perdido (g/kWh)	0.433463	capital perdido ($/h)	6.99011

Fig. 3.4. Consumo específico real, perdido y capital perdido

3.2.3 Módulo “AEGE”

3.2.3.1 Datos ingresados

Al seleccionar el módulo AEGE (por sus siglas Análisis Exergoeconómico de Grupos Electrógenos) se abre la ventana de cálculos fig.3.1, en dicha ventana se observa a la izquierda dos paneles para ingresar datos: los datos del combustible y los datos de costos y a la derecha se muestra un diagrama que da respuesta al balance de exergía y los principales resultados obtenidos en el cálculo exergoeconómico.

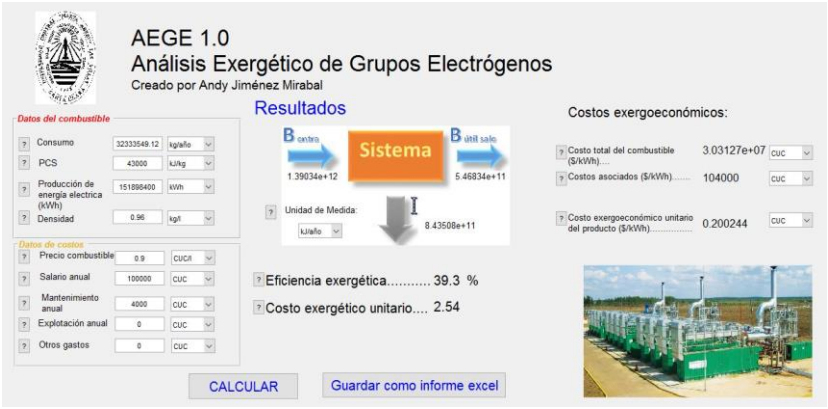

Fig.3.1.Ventana de cálculos

-Datos del combustible

El primer dato a ingresar es el consumo de combustible en el año, luego se ingresa el PCS: Poder Calorífico Superior, este dato en realidad no es el más idóneo para utilizar, sin embargo se aproxima considerablemente al valor derivado de calcular la exergía de entrada como la exergía del combustible de acuerdo a su composición química como se observó en el capítulo anterior, luego se ingresa la producción de energía eléctrica, y la densidad.

-Datos de costos

Se ingresan también los datos de costos, estos son: el precio del combustible, (que sería el precio de un litro de combustible), El Salario Anual de todos los empleados del grupo electrógeno, el costo del mantenimiento realizado en un año, la explotación anual y otros gastos.

3.2.3.2 Resultados

Después de ingresar los datos correctamente y seleccionar en la casilla al lado de cada dato la unidad de medida que corresponde, se procede a hacer clic en el botón calcular que se encuentra debajo de los datos de costos, es entonces cuando el programa realiza el análisis exergético de acuerdo a los datos ingresados.

El primer resultado es el diagrama que representa el balance de energía Fig.3.2, Siendo “Bentra” la exergía que entra al sistema que no es más que la exergía del combustible, “Butil_sale” corresponde a la exergía que sale del sistema, (para este volumen de control) la exergía útil que sería la exergía de la producción de energía eléctrica, también se observa la variable “I” como la irreversibilidad que sería la suma de la destrucción de la exergía y las pérdidas, se observan también la eficiencia exergética, el costo exergético unitario y los costos exergoeconómicos.

Fig.3.2. Balance de exergía

3.2.3.3 Posibilidad del software de trabajar en diferentes unidades de medida

El software brinda la posibilidad de cambiar las unidades de medidas de cualquier dato o de cualquier resultado, para evitar que el usuario realice las conversiones manualmente. A la derecha de cada dato o resultado se observa su unidad de medida por defecto, y haciendo clic en dicha pestaña se abre una lista desplegable con otras unidades de medida que también puede usarFig.3.3, luego de seleccionar la unidad de medida deseada es necesario hacer clic en el botón “calcular” para que el programa calcule el sistema para las unidades de medidas seleccionadas. En la tabla 3.1 se observa cada variable con las unidades de medidas disponibles en el programa.

Fig.3.3. Lista desplegable para seleccionar la unidad de medida

Tabla 3.1: Unidades de medida disponibles en el software AEGE 1.0

Variables	**U/M**
Consumo (kg/año)	Kg, l, ton, lb
Poder Calórico Superior (kJ/kg)	kJ/kg, kWh/kg
Producción de Energía Eléctrica (kWh)	kWh, MWh , kJ
Densidad (kg/l)	Kg/l, °API
Precio del combustible (CUC/l)	CUC/l CUP/l
Salario Anual (CUC)	CUC CUP
Mantenimiento Anual (CUC)	CUC CUP
B entra (kJ/año)	kJ, kWh, MWh
B útil sale (kJ/año)	kJ, kWh, MWh
Irreversibilidad (kJ/año)	kJ, kWh, MWh
Eficiencia Exergética (%)	
Costo exergético unitario	
Valor del combustible (CUC)	CUC CUP
Costos asociados (CUC)	CUC CUP
Costo exergoeconómico unitario (CUC/kWh)	CUC CUP

3.2.3.4 Sistema de ayuda

Cada variable del software presenta un botón a la izquierda con un signo de pregunta “?” que al presionarlo se abre una ventana que ofrece ayuda e información facilitando así una manera sencilla de analizar los resultados y de ingresar los datos correctamente Fig.3.4.

Fig.3.4. Ventana de ayuda

Conclusiones

- Aplicando el modelo físico-matemático diseñado para optimizar la distribución de cargas de los motores en el grupo electrógeno de Fueloil Santa Clara Industrial se logra ahorrar 7 CUC por hora y se disminuye en 0.001 CUC/kWh el costo exergoeconómico unitario.
- Calculando el porciento que representa la disminución de las emisiones de contaminantes aplicando el modelo de optimización, se obtiene un decremento de 0.2 % para cada emisión de contaminantes.
- A través de Matlab se crea un software que facilite los cálculos de optimización y los cálculos exergoeconómicos.

Recomendaciones

Sería útil que para proyectos futuros se modifique el software; por ejemplo, sería valioso que los datos de entrada fueran tomados automáticamente de los medidores existentes en el emplazamiento, y así, de una manera más precisa se pueda adquirir estos resultados para cualquier intervalo de tiempo, esto puede crearse incluso respetando la estructura de los comandos del software en Matlab si se usara el entorno Simulink para facilitar este proceso, también sería útil que el usuario pueda seleccionar otro volumen de control en dependencia de los objetivos que quiera lograr, facilitando así el diseño de complejos sistemas y convendría que se ampliaran las listas desplegables con más unidades de medidas.

Bibliografía

- ACKERMANN, T., ANDERSSON, G. & SÖDER, L. (2001) *Distributed generation: a definition*.
- ACOSTA, L. A. C. (2017) Estudio de la explotación actual y futura de la Central Eléctrica UEB Cayo Santa María con motores de combustión interna utilizando combustible fuel oil.
- ARÁNGUEZ, E., ORDÓÑEZ, J. M., SERRANO, J., ARAGONÉS, N., FERNÁNDEZ-PATIER, R., GANDARILLAS, A. & GALÁN, I. (1999) Contaminantes atmosféricos y su vigilancia. *Revista española de salud pública*.
- ARMAS, J. J. V. D. (2017) Mejoras en sistema SCADA para la operación automática de carga en grupos electrógenos Hyundai.
- AYRES, R. U., AYRES, L. W. & MARTINAS, K. (1996) Eco-Termodynamics: Exergy and Life-Cycle Analysis.
- CENGEL, Y. A. & BOLES, M. A. (2012) *Termodinámica*.
- DELGADO, W. P. (2017) Potenciales de cogeneración en la central de grupos electrógenos de fuel oil Santa Clara 110 kV.
- DINCER, I. & CENGEL, Y. A. (2001) *Energy, Entropy and Exergy Concepts and Their Roles in Thermal Engineering*.
- ELSOM, D. (1990) *La contaminación atmosférica,* Madrid.
- EPA (2004) Factor Information REtrieval (FIRE) Software, Technology Transfer Network Clearinghouse for Inventories & Emissions Factors.
- FERNÁNDEZ, M. F., FUENTES, R. D., FERNÁNDEZ, M. C. & MONTIEL, Á. C. (2007) Calidad de la energía y generación distribuida en Cuba.
- FERNÁNDEZ, M. F., FUENTES, R. D., FERNÁNDEZ, M. C. & MONTIEL, Á. C. (2010) Calidad de la energía y generación distribuida en Cuba. *Revista Cubana de Ingeniería.*
- GLASSTONE, S. (1946) *Textbook of Physical Chemistry*.
- GONZÁLEZ, F. G. (2013) Potenciales de cogeneración en la central de grupos electrógenos de fuel oil (GEF) de Cayo Santa María.
- GRAEDEL, T. E. & GRUTZEN, P. J. (1989) Una atmósfera cambiante.
- GROUP, D. O. D. G. C.-O. (2002) Distributed GenerationFact Sheet.
- JENKINS, N., ALLAN, R., CROSSLEY, P., KIRSCHEN, D. & STRBAC, G. (2000) Embedded Generation. *Institution of Electrical Engineers.*

- MARTÍNEZ, P. D. L. C. (2016) Gestión integral de las aguas residuales generadas en las centrales eléctricas que operan con diésel y fuel oil
- MARTÍNEZ, P. J. B. (2013) Técnicas de diagnóstico y fallas en los motores de combustión interna fuel oil de la generación distribuida de electricidad.
- NATIONAL ELECTRIC UNION (2010) *Management Manual (MAGEST),* Cuba.
- QUINTERO, J. P. V. (2008) Generación distribuida: democratización de la energía eléctrica. *Criterio Libre***,** 105-112.
- REGUERAL, B. G. D. (2003) Análisis exergético y evaluación termoeconómica de un ciclo combinado de generación de energía eléctrica
- *Departamento de Ingeniería Química y Combustibles.*
- ROJAS, D. A. P. (2015) Introducción al análisis exergo-económico: conceptos y aplicaciones.
- ROUCO, A. N. J. (2007) Estudio de la operación óptima de la generación con fuel oil y diesel en Villa Clara.
- SCIUBBA, E. & WALL, G. (2007) *A Brief Commented History of Exergy From the Beginnings to 2004*.
- SCHWARTZ, L. (2005) Distributed Generation in Oregon: Overview, Regulatory Barriers and Recommendations.
- SZARGUT, J., MORRIS, D. R. & STEWARD, F. R. (1988) Exergy Analysis of Thermal, Chemical and Metalurgical Processes.
- TORRES, Y. L. (2011) Estudio del Lodo producido en la Generación Distribuida y su posible utilización como combustible en diferentes instalaciones industriales. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.
- WALL, G. (1992) A Bibliography of Exergy.
- WILLIS, H. L. & SCOTT, W. G. (2000) *Distributed Power Generation. Planning and Evaluation*.
- WYLEN, G. J. V. & SONNTAG, R. E. (1965) *Fundamentals of Classical Thermodynamics*.