

Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas

Facultad de Ingeniería Mecánica

(CEETA)

Centro de Estudios Energéticos y Tecnologías Ambientales



TRABAJO DE DIPLOMA

Sistema de Gestión Total de Eficiencia Energética aplicado a la central eléctrica UEB Cayo Santa María y cálculo del ciclo del motor de combustión interna.

Autor: Javier Sotolongo Brito

Tutores: Msc. Reinaldo Martínez Martínez

Msc. Eduardo M. Fírvida Donéstevez

Santa Clara

2015

"Año 57 de la Revolución"



Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería Mecánica, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Firma del Tutor

Firma del Jefe de
Departamento donde se
defiende el trabajo

Firma del Responsable de
Información Científico-Técnica

*“Hay una fuerza
concentrada, colérica, expectante
en el fondo sereno
de mi organismo; hay algo,
hay algo que reclama
Una función oscura y formidable.*

*Es un anhelo
impreciso de árbol; un impulso
de ascender y ascender hasta que pueda
¡rendir montañas y amasar estrellas!
¡Crecer, crecer hasta lo inmensurable!*

*No por el suave
placer de la ascensión, no por la fútil
vanidad de ser grande...”*

Rubén Martínez Villena

DEDICATORIA

A mi familia que me ha apoyado en cada momento.

Al Msc. Reinaldo Martínez Martínez y Msc.

Eduardo Miguel Férvida Donísteres por sus esfuerzos y conocimientos para mi formación profesional.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia por aconsejarme y llevarme siempre por el mejor camino.

A mis tutores que siempre me apoyaron y me brindaron sus conocimientos.

A mis compañeros de grupo y a todo el que de una forma u otra tuvo que ver con este trabajo

TAREA TÉCNICA

La Tarea Técnica en este trabajo de diploma consistió en realizar un estudio de la eficiencia energética en la UEB Cayo Santa María y además la complementación de un software para el cálculo del ciclo de trabajo de los Motores de Combustión Interna (MCI).

Firma del Autor

Firma del Tutor

RESUMEN

En el presente trabajo se realizó un estudio del estado del arte de la Generación Distribuida (GD) a nivel mundial y en nuestro país, además de las diferentes tecnologías empleadas en la GD. Las principales tecnologías de generación distribuida son: las turbinas eólicas, los paneles y colectores solares, las biofuentes energéticas y los Motores de Combustión Interna (MCI). Se explican las principales características de los motores utilizados para generar energía eléctrica en Cuba y particularmente en la Central Eléctrica Cayo Santa María. Posteriormente se realiza un análisis de la eficiencia energética en dicha entidad, donde se deciden los principales equipos consumidores de energía, en este caso combustible, ya que la instalación es la encargada de suministrar energía eléctrica a toda la red hotelera de la cayería norte de Villa Clara. Luego se realizó el cálculo de un motor diésel sobrecargado mediante el software Matlab, el cual complementa una serie de cálculos realizados anteriormente para motores diésel y de gasolina. Como resultado del estudio realizado en la planta se concluyó que el fuel oil es el principal combustible empleado en la generación eléctrica, además los motores MAN generan la mayor parte de la energía demanda. También se brindan una serie de oportunidades de ahorro en la instalación para aumentar la eficiencia energética y con ello reducir los insumos de la entidad.

SUMMARY

In this paper a study of the state of the art of distributed generation (DG) worldwide and in our country took place in addition to the different technologies used in the GD. The main distributed generation technologies are: wind turbines, solar panels and collectors, bio energy sources and Internal Combustion Engines (MCI). The main characteristics of the engines used to generate electricity in Cuba and particularly in the Central Electric Cayo Santa Maria are explained. Subsequently, an analysis of energy efficiency in the former entity is made, where the main energy consuming equipment are selected, in this case fuel, due the fact that the facility is responsible for supplying electricity to the hotel network throughout the northern keys of Villa Clara. Afterward the calculation of an overloaded diesel engine was made using the Matlab software, which complements a series of calculations previously made for diesel and gasoline. As a result of the study on the ground it was found that fuel oil is the main fuel used in electricity generation, plus that MAN engines generate most of the energy demand. A number of savings opportunities are also provided at the facility to increase energy efficiency and thereby reduce inputs of the entity.

TABLA DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
TAREA TÉCNICA	iv
RESUMEN	v
SUMMARY	i
INTRODUCCIÓN	4
CAPÍTULO 1. Estado del Arte.....	7
1.1 Tecnologías Disponibles	8
1.1.1 Micro Turbinas.....	10
1.1.2 Celdas de Combustible (Fuel Cells).....	11
1.1.3 Electricidad Solar	13
1.1.4 Biofuentes de Electricidad	15
1.1.5 Energía Eólica	16
1.1.6 Motor Stirling.....	19
1.1.7 Motores de Combustión Interna (MCI)	20
1.1.8 Sistemas de almacenamiento.....	22
1.2 Generación Distribuida en Cuba.....	24
1.2.1 Reseña Histórica.....	25
1.3 Descripción de algunos de los motores utilizados en la Generación Distribuida.....	26
1.3.1 Motor Hyundai HIMSEN 9H21/32.....	26
1.3.2 Motor MAN 18V 28/32 S	30
1.3.3 Motor MTU 4000 16V G81.....	34
1.3.4 Motor MAN B & W 18 V 48/60	38

1.3.5	Motor MAN B & W 16 V 32/40	38
1.3.6	Motor MAN B & W 18 V 51/60	39
1.3.7	Motor a gas GE Jenbacher J 620 F 111	40
1.4	Eficiencia Energética	40
1.4.1	Sistema de gestion energética.....	41
1.4.2	Sistema de Gestión Total de Eficiencia Energética (SGTEE)	41
1.4.3	Norma ISO 50001	41
1.5	Conclusiones parciales.....	43
CAPÍTULO 2. Sistema de Gestión Total de Eficiencia Energética (SGTEE) aplicado a la Central Eléctrica de Cayo Santa María.....		44
2.1	Estructura de consumo de portadores energéticos durante el año 2014. .	46
2.2	Índices de eficiencia energética.....	51
2.3	Principales consumidores	53
2.4	Determinación de los puestos claves.	54
2.4.1	Oportunidades en ahorro en iluminación.	55
2.4.2	Oportunidades de ahorro en los motores eléctricos.....	55
2.4.3	Oportunidades de ahorro en los sistemas de Aire Acondicionado.	55
2.5	Conclusiones parciales.....	56
CAPÍTULO 3. Cálculo del ciclo de trabajo del Motor de Combustión Interna (MCI). 57		
3.1	Parámetros Iniciales.	57
3.1.1	Combustible líquido.	57
3.1.2	Combustible gaseoso.....	60
3.2	Parámetros del proceso de admisión.....	62
3.3	Parámetros del proceso de compresión.....	64

3.4	Parámetros al final del proceso de combustión.	64
3.5	Parámetros del proceso de expansión.	68
3.6	Parámetros de escape.	70
3.7	Parámetros principales del ciclo.	73
3.8	Validación del software para el cálculo del ciclo de trabajo del motor desarrollado en Matlab.	77
3.9	Conclusiones parciales.	81
CONCLUSIONES		82
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA		84
ANEXOS.....		86

INTRODUCCIÓN

La generación Distribuida es una nueva tendencia en la generación de calor y generación eléctrica. El concepto Recursos de Energía Distribuidos (DER) permite a los "consumidores" generar calor o electricidad para sus propias necesidades (como en una estación de hidrógeno y microgeneración) para enviar la corriente eléctrica sobrante de vuelta a la red de energía eléctrica o compartir el exceso de calor por medio de una red de calefacción distribuida. Los sistemas de generación distribuida con sistemas de Cogeneración o Calor y Energía combinada (CHP por las siglas en Inglés de Combined Heat and Power) pueden ser muy eficientes, usando hasta el 90% de la energía potencial en el combustible que consumen. La Cogeneración puede también ahorrar mucho dinero y combustible. Las Estimaciones afirman que tiene el potencial para reducir el uso de energía de un país como EE.UU. hasta el 40%. Un cluster de instalaciones de generación distribuida puede verse como una planta de energía virtual.

Incluso aunque el término "generación distribuida" está bien comprendido, términos como energía distribuida, recursos de energía distribuida, generación embebida, potencia descentralizada, generación dispersa, y generación "onsite" pueden también encontrarse en la literatura. Aunque algunos de esos términos pueden usarse con distinto significado, normalmente se refieren a la generación distribuida.

La definición más global de la generación distribuida vendría a decir que es aquella que se conecta a la red de distribución y que se caracteriza por encontrarse instalada en puntos cercanos al consumo. Sus características generales son: - Reducen pérdidas en la red al reducir los flujos de energía por la red. - Su energía vertida no revierte flujos hacia la red de transporte. - Suelen tener potencias inferiores a 50MW aunque en general se suele decir que no sobrepasan 10MVA de potencia instalada.

La introducción de la Generación Distribuida constituye uno de los pasos más significativos en el desarrollo de los sistemas eléctricos, ya que estas pequeñas plantas no sufren grandes pérdidas en la transmisión, por lo que son más económicas, además la energía eléctrica que entregan cuenta con mayores

parámetros de calidad, esencial para sistemas industriales modernos, donde interrupciones o variaciones de voltaje tendrían consecuencias negativas y pérdidas económicamente cuantiosas.

En Cuba, hasta hace pocos años, la generación de energía eléctrica se basaba en las centrales termoeléctricas y solo un ínfima parte estaba a cargo de instalaciones hidroeléctricas y eólicas. Actualmente la generación en nuestro país está centrada en ocho termoeléctricas, las cuales abarcan alrededor del 64 % de la demanda del país, la empresa mixta ENERGAS (generación a partir del gas acompañante del crudo nacional) tiene a su cargo aproximadamente el 15 % de esta demanda y por último un 10 % se suple a través de los grupos electrógenos Fuel y Diésel.

Cuba bajo el programa de la Revolución Energética decide pasar de una Generación Concentrada en solo una decena de puntos en el país a una Generación Distribuida a base de motores de combustión interna en una primera etapa, en más de doscientos puntos. Por las características de esta generación se prevé la disminución de las pérdidas eléctricas, así como la mejora sustancial de los costos, al tener mejores índices de eficiencia energética según las experiencias consultadas internacionalmente.

Villa Clara no ha estado exenta a estos cambios, por lo que hoy cuenta con varios emplazamientos de Generación Distribuida. Los principales son Santa Clara 110, que posee 3 baterías de 4 motores cada una, Santa Clara Industrial, que tiene 3 baterías de 4 motores, Calabazar de Sagua que cuenta con 2 baterías de 4 motores y una de las más importantes por su respaldo al turismo en la cayería norte de Villa clara, la Central Eléctrica de Cayo Santa María, que cuenta con 3 baterías de 4 motores Fuel Oil, 2 motores Fuel Oil de mayor capacidad y 12 motores Diésel.

Los motores que se trataran en el presente trabajo son: motor Hyundai HIMSEN H21/32, el motor MAN-V28/32S, motor MAN B & W 16 V 32/40, motor MAN B & W 18 V 48/60 y el motor MAN B & W 18 V 32/40, el motor MTU Serie 4000 modelo 16 V 4000 G81 con 16,4 ton de peso y motor de gas GE Jenbacher tipo J 620 F 111. El grupo motor-generator está compuesto por un motor diésel MTU 16V4000

G81, el generador eléctrico Marelli 1.7 MW. El motor diésel 16V4000 está diseñado para trabajar seis horas al día, tiene una potencia mecánica de 1800 kW, 16 cilindros en V y 1800 rpm de velocidad nominal. El generador eléctrico Marelli es trifásico sincrónico, con una potencia nominal de 2345 kW, un voltaje nominal de 480 kV, corriente nominal de 295.1 A y una frecuencia de 60 Hz.

Objetivo General:

- Aplicar el Sistema de Gestión Total de Eficiencia Energética (SGTEE) a la Central Eléctrica (C.E) de Cayo Santa María y completar la construcción del software existente para el cálculo de los Motores de Combustión Interna (MCI) añadiendo el motor diésel sobrecargado.

Objetivos Específicos:

- Actualizar el Estado del Arte.
- Aplicar el SGTEE a la C.E Cayo Santa María.
- Completar y aplicar el software existente para el cálculo del ciclo de los MCI con la inclusión del motor diésel sobrecargado.

CAPÍTULO 1. Estado del Arte

Un número de pronósticos dados por las autoridades competentes estiman que el uso de la energía eléctrica crecerá a 23 trillones de kWh en el año 2020. Por otra parte, el mercado financiero global se ha desarrollado y la tecnología ha experimentado un acelerado avance; haciendo posible que el tamaño óptimo de las inversiones nuevas en la producción de electricidad se reduzcan en referencia al tamaño del mercado y a la capacidad financiera privada. Además los procesos de desregulación que han aparecido en el mundo, están haciendo posible la competencia en el negocio de la generación de electricidad, y un cambio radical ha aparecido en el comportamiento de los costos de generación respecto a pasadas décadas, debido a los cambios tecnológicos.

Las constantes presiones ambientalistas a escala global, han llevado a empresas eléctrica a mirar hacia otras fuentes de generación menos agresivas con el medio ambiente, por lo que las fuentes alternativas han calado el sector eléctrico pasando de aplicaciones remotas y/o aisladas con una capacidad minúscula a una penetración masiva de decenas de MW. De modo que, algunos factores han aparecido motivando a las empresas del sector a verificar su enfoque sobre el negocio desde la misma raíz, cambiando su paradigma desde empresas gigantes, verticalmente integradas, a un modelo desagregado, con alta penetración de un sistema de generación con capacidad más pequeña a las tradicionales (más de 5kW y menos de 5MW), sin ser operadas centralmente ni despachadas, con características menos contaminantes y ubicadas lo más cerca posible del consumidor, conocidas como *Generación Distribuida (GD)*.

La Generación Distribuida hoy es una realidad. En países como Dinamarca el porcentaje de GD llega hasta más del 37 % y en los Países Bajos alcanza más del 40 %. A nivel global la capacidad de generación eléctrica se espera que se incremente en un 50 % de los próximos 20 años y se proyecta que más de 7 millones de MW de nueva capacidad de generación sea requerida para atender la demanda en el año 2020, además se estima que el mercado de la GD pueda ser de 1 millón de MW asumiendo un 15 % del mercado. La Generación Distribuida se

presenta competitiva ante las tradicionales centrales de generación por varios aspectos:

- Cambios asociados a la entrega de potencia muy cerca del consumidor.
- El cargo por capacidad de la potencia disponible.
- Las pérdidas de transmisión.
- Los peajes de distribución.
- La confiabilidad.
- El control de la demanda.
- Las emisiones contaminantes reducidas.

Un aspecto en que la GD ha resultado atractiva a las empresas es el hecho de poder diferir las inversiones en el sistema transmisión, por la capacidad liberada por su instalación cercana al consumidor. (González-Longatt, 2004)

1.1 Tecnologías Disponibles

Algunas Fuentes de Generación Distribuida (FGD) son novedosas y se mantienen en desarrollo mientras que otras son tecnologías ya maduras y afianzadas en el mercado. Algunas de ellas son reconocidas como generadores de respaldo (*back-up generators*), o generación en sitio (*on-site power*). Las FGD pueden ser agrupadas en función a varios puntos de vista. Un criterio es en función a su agresión al medio ambiente: fuentes tradicionales y fuentes alternativas. Aunque un criterio muy común agrupa las tecnologías en generación y almacenamiento. (González-Longatt, 2004)

Los sistemas empleados como fuentes de energía distribuida (FED) son plantas de generación de energía a pequeña escala (normalmente entre el rango de 3 kW a 10.000 kW) usadas para proporcionar una alternativa o una ayuda a las tradicionales centrales de generación eléctricas. El problema radica en que estos generadores distribuidos son bastantes caros de instalar y poner en marcha.

Una popular fuente de energía distribuida son los paneles solares en los tejados de edificaciones. El coste de producción está entre 0,99 € a 2,00 € por vatio (2007) más la instalación y los equipos de suministro. Sin embargo la Energía Nuclear está por encima de 2,2€ a 6,00€ por W (2007). Algunas células solares (las del

tipo "película delgada") presentan problemas al final de su vida útil, ya que poseen metales pesados, tales como telurio de cadmio (CdTe) y CIGS (CuInGaSe) que es un material compuesto por cobre, indio, galio y selenio. El lado positivo es que a diferencia del carbón y la nuclear, no hay coste de combustible o materias primas, ni contaminación, y requieren de mínima seguridad en su funcionamiento. La Solar también tiene un bajo ciclo de trabajo, produciendo picos de potencia en periodos diarios. El ciclo de trabajo medio típico es del 20%.

Otra fuente son los pequeños generadores eólicos, estos tienen bajo mantenimiento, y baja contaminación. El coste de su instalación es (\$0.80/W, 2007) mayor por vatio que la centrales tradicionales, excepto en las áreas con mucho viento donde los ratios de producción aumentan considerablemente. Las torres y generadores eólicos exigen de mayor coste en seguros causado por el hecho del viento y la soledad de las instalaciones, pero poseen una buena fiabilidad en el funcionamiento. La eólica suele ser complementaria a la solar; en los días cuando no hay sol suele hacer viento y viceversa¹ Algunos emplazamientos de generación distribuida combinan energía eólica con energía solar como por ejemplo Slippery Rock University, la cual puede ser monitorizada online. Las fuentes de cogeneración distribuida usan micro turbina de gas natural como combustible o motores de explosión para activar los generadores. El calor generado es aprovechado para calentar aire o agua, o para activar un refrigerador por absorción para aire acondicionado. El fuel limpio genera poca polución. Estas plantas combinadas de generación eléctrica y calor normalmente tienen una irregular fiabilidad, aun así poseen excelentes coste de mantenimiento, aunque otros costes son inaceptables.

Los cogeneradores son además más caros por vatio que las centrales generadoras. Estas instalaciones han experimentado un auge porque las industrias consumen combustibles, y la cogeneración puede extraer un valor añadido a este fuel.

Algunas grandes instalaciones utilizan generación de ciclo combinado. Normalmente estas consisten en una turbina de gas que hierve agua para actuar sobre una turbina de vapor en un ciclo de Rankine. El condensador del ciclo de

vapor proporciona el calor para calentar el aire o un refrigerado por absorción. Las plantas de ciclo combinado tienen grandes eficiencias térmicas, a menudo sobrepasando el 85%.

Una futura generación de vehículos eléctricos será capaz de entregar energía de su batería a la red de suministro de electricidad cuando se necesite. Esto podría ser una importante fuente de generación distribuida en el futuro. (Martínez, 2014)

1.1.1 Micro Turbinas

Las micro turbinas son pequeños generadores de electricidad que queman combustible (líquido o gaseoso) para crear una rotación de alta velocidad en un generador de electricidad. Evolucionaron de los turbo cargadores de los automóviles y camiones, unidades de potencia auxiliar de aviones, y motores de aeroplanos pequeños. Las micro turbinas constituidas por un compresor, combustor, turbina, alternador, recuperador (intercambiador de calor interno) y generador. Las máquinas generalmente rotan alrededor de las 40 000 rpm, empleando rodamientos en aceite o aire. Las micro turbinas pueden ser clasificadas según el arreglo físico de sus partes y componentes. Según el número de ejes: eje sencillo y eje partido. Según el ciclo de calor empleado: ciclo sencillo o recuperado. Las de un solo eje constituyen el diseño más común debido a que es simple y menos costoso de construir, mientras que las de eje partido no requieren un inversor para cambiar la frecuencia de la potencia (AC). Por su parte, la micro turbina de ciclo simple tiene un costo inferior, la confiabilidad más alta, y más calor queda disponible para aplicaciones de cogeneración que en las unidades recuperadas, pero estas últimas poseen un ahorro de combustible de precalentamiento del 30-40 %. Las micro turbinas ofrecen un número de ventajas potenciales: pocas partes móviles, tamaño compacto, peso ligero, gran eficiencia, electricidad de bajo costo y la oportunidad de utilizar combustibles de desecho. (González-Longatt, 2004)

Tabla 1. Características de eficiencia de sistemas de micro turbinas.(González-Longatt, 2004)

Características de rendimiento	Capstone modelo (330-30 kW)	IR Energy System LM*- 70 kW	Turbec T100-100 kW	DTE**-350 kW
Capacidad de Electricidad Nominal (kW)	30 kW	70 kW	100 kW	350 kW
Heat Rate Eléctrica (Btu/kWh)	14,581	13,540	12,637	11,766
Eficiencia Eléctrica (%)	23.4	25.2	27.0	29.0
Entrada de Combustible (MMBtu/hr)	0.437	0.948	1.264	4.118
Presión de Gas Combustible Requerida (psig)	55	55	75	135

1.1.2 Celdas de Combustible (Fuel Cells)

Una celda de combustible es un equipo de conversión electroquímico que convierte el hidrógeno y el oxígeno en electricidad y calor. Esta es muy semejante a una batería que puede ser recargada mientras se entrega potencia de ella. En vez de recargarse usando electricidad, una celda de combustible usa el hidrógeno y el oxígeno. Constructivamente consta de dos electrodos: un ánodo y un cátodo, separado por un electrolito. La primera celda de combustible operativa fue producida por Sir. William Grove en 1842. La tecnología avanzó poco a poco, pero tomo un salto gigantesco en 1960, cuando *General Electric* produjo la primera aplicación práctica de la celda de combustible, cuando esta suministró energía eléctrica a las cápsulas espaciales Gemini y Apollo. La diferencia principal entre la mayoría de las celdas es el tipo de electrolito. Algunos tipos de electrolitos usados

son: ácido fosfórico, carbonato fundido, el óxido sólido y la membrana de intercambio. (González-Longatt, 2004)

Las celdas de combustible prometen entregar una eficiencia de conversión eléctrica en el rango de 40 a 60 %. Una eficiencia de conversión total de energía cercana al 90 %, es posibles cuando son usadas aplicaciones de cogeneración, donde tanto el calor como la electricidad de la reacción son utilizadas. Otra característica promisoría es la muy baja emisión contaminante de las celdas de combustible, debido a que ellas producen electricidad sin combustión. Las mismas también operan silenciosamente y confiablemente. Las celdas están siendo desarrolladas en un rango de unos pocos kW hasta unos pocos MW. Sin embargo, las unidades más grandes (hasta 20 MW) y las más pequeñas (micro celdas) para equipos portátiles están siendo investigadas con avances notables. (González-Longatt, 2004)

El costo inicial de las celdas de combustible es muy alto comparado con otras tecnologías. El único producto disponible comercialmente en la actualidad es el PC-25 construido por UTC. En el 2001 el costo de instalación de la unidad era de aproximadamente 4000 US\$/kW. El costo total de la instalación puede alcanzar valores de 1 millón US\$. Para una salida de 200 kW, este significa alrededor de 5000 US\$/kW instalado. Como la mayoría de las tecnologías, mientras más unidades nuevas sean instaladas y nuevos competidores entren al mercado, los precios están orientados a disminuir. Las proyecciones de precios de las celdas de combustible varían pero la mayoría de los fabricantes apuntan a costos por debajo de los 1500 US\$/kW basados en el volumen de producción. Los sistemas de suministro de combustible y los sistemas de reforma pueden requerir mantenimiento una vez al año. Las celdas no necesitan mantenimiento hasta el final de su vida útil. El mantenimiento y confiabilidad de los sistemas requiere ser probados a largo plazo en sistemas a gran escala. Los costos de mantenimiento de una celda se espera sean comparables con el de las micro turbinas, en rangos entre los 0.005-0.010 US\$/kW. (González-Longatt, 2004)

Tabla 2. Características de Eficiencia de Celdas de Combustible. (González-Longatt, 2004)

Tipo de Celda	PAFC	PEM	PEM	MCFC	MCFC	SOFC
Capacidad de Generación Nominal (kW)	200	10	200	250	2000	100
Temperatura de Operación (°F)	400	150	150	1200	1200	1750
Costo del Paquete (US\$/kW)	3850	4700	2950	4350	2400	2850
Heat Rate Eléctrico (BTU/kWh)	9480	11370	9750	9730	7420	7580
Eficiencia Eléctrica (%)	36	30	35	43	46	45
Entrada de Combustible (MMBTU/h)	1.90	0.10	2.00	2.00	14.80	0.80

1.1.3 Electricidad Solar

Los sistemas solares de energía eléctrica transforman la luz del sol en electricidad. Las celdas solares, también conocidas como celdas fotovoltaicas (*PV: Photovoltaic*), hacen el trabajo de producir electricidad. Hay algunos tipos de tecnologías eléctricas solares actualmente bajo desarrollo, pero cuatro: cristales de silicio (una forma refinada de la arena de playa), películas delgada, concentradores, y termo fotovoltaico: son un rango ilustrativo del rango de tecnologías.

Cristales de Silicio. Son hechas usando una corte desde un solo cristal cilíndrico de silicio, esta es la tecnología fotovoltaica más eficiente. La ventaja principal de las celdas mono-cristalinas es su eficiencia alta, típicamente alrededor del 15%, aunque el proceso de manufactura es complicado, requiere enormes cantidades de energía, causando un incremento substancialmente más alto en los costos de producción que las otras tecnologías. Las celdas solares de cristales de silicio son usados en más de la mitad de los equipos solares eléctricos. Las celdas multi-cristalinas son más baratas de producir que las mono-cristalinas, debido al proceso simple de fabricación. Sin embargo, ellas tienden a ser ligeramente menos eficientes, con una eficiencia media de alrededor de 12%.

Películas delgadas. La película delgada, es otra tecnología más barata para producir electricidad pero algo menos eficiente que los módulos de silicio cristalino. La tecnología más desarrollada de las películas delgadas usa el silicio amorfo, en el cual los átomos no están arreglados en un orden particular como lo estarían en un cristal. Una película delgada de silicio amorfo, de solo un micrón de espesor puede absorber 90% de la energía solar usable que cae en él. Otros materiales de película delgada incluyen el Telurio de Cadmio, y el cobre indio diseluido. Substantial disminución en costos son posible con esta tecnología debido a que requiere relativamente menos materiales semiconductores.

Concentradores Solares. Los sistemas concentradores usan lentes o reflectores para enfocar la luz solar en la celda solar o modulo, la idea es magnificar la intensidad de la luz, la celda solar produce más electricidad. La eficiencia del módulo puede estar en un rango de hasta 17%, y celdas con concentradores han sido diseñados con eficiencias de conversión que exceden de 30%. Los concentradores trabajan solo con los rayos solares directos y operan más eficientemente en climas soleados u secos.

Termo fotovoltaico. Los dispositivos termo fotovoltaicos (TPV) convierten el calor en la misma vía en que otros equipos PV convierten la luz en electricidad. En este caso se emplea un semiconductor sintonizado a la longitud de onda emitida por la radiación infrarroja emitido por cuerpos calientes. Los convertidores TPV son relativamente libres de mantenimiento, debido a que no contienen partes móviles. Además usar la energía solar, ellos pueden convertir el calor de alguna fuente de calor de alta temperatura, incluyendo la combustión de una fuente como gas natural o propano en electricidad. Los convertidores TPV virtualmente no emiten monóxido de carbono.

El desempeño de las celdas y módulos fotovoltaicos es frecuentemente expresado en términos de la eficiencia de conversión La eficacia de un módulo es bastante importante. La eficiencia más alta de módulo, implica que menos módulos son necesarios. El límite teórico de eficacia para un módulo fotovoltaico está en el orden del 25 %, esto supondría una producción aproximada de entre 120-250 W/m² en función de la eficiencia del panel fotovoltaico. La eficacia real de un

módulo solar que puede ser obtenido en la práctica es algo inferior que el límite teórico y depende en mayor grado sobre el proceso de la fabricación y la utilización de materiales en la construcción del módulo. El objetivo final del fabricante, es un módulo solar cuya eficiencia se acerque al 25%, aunque están produciéndose grandes avances en la tecnología fotovoltaica y ya existen paneles experimentales con rendimientos superiores al 40%.(González-Longatt, 2004, Roper, 2011)

El coste de las células solares de silicio cristalino ha descendido desde 76,67 \$/Wp en 1977 hasta aproximadamente 0,74 \$/Wp en 2013. Esta tendencia sigue la llamada "ley de Swanson", una predicción similar a la conocida Ley de Moore, que establece que los precios de los módulos solares descienden un 20% cada vez que se duplica la capacidad de la industria fotovoltaica.

En 2011, el precio de los módulos solares se había reducido en un 60% desde el verano de 2008, colocando a la energía solar por primera vez en una posición competitiva con el precio de la electricidad pagado por el consumidor en un buen número de países soleados. Se ha producido una dura competencia en la cadena de producción, y asimismo se esperan mayores caídas del coste de la energía fotovoltaica en los próximos años, lo que supone una creciente amenaza al dominio de las fuentes de generación basadas en las energías fósiles. Conforme pasa el tiempo, las tecnologías de generación renovable son generalmente más baratas, mientras que las energías fósiles se vuelven más caras.(Roper, 2011)

1.1.4 Biofuentes de Electricidad

La bioelectricidad, también llamada bioenergía, es la electricidad producida por los combustibles de biomasa. Los combustibles de biomasa incluyen residuos provenientes de la madera, residuos de producción de alimentos, y combustibles gaseosos producidos de biomasa sólida, desechos de animal, o terraplenes. La tecnología bioeléctrica convierte los combustibles renovables de biomasa en electricidad (y calor) usando modernos calentadores, gasificadores, turbinas y generadores celdas de combustibles y otras tecnologías. La mayoría de la electricidad generada a partir de la biomasa es por medio de un ciclo de vapor. La

biomasa puede ser también quemado junto con el carbón en una caldera (en una planta de generación convencional) para producir vapor y electricidad. Esto es ventajoso para las empresas eléctricas ya que obtienen algunos beneficios ambientales del uso de la energía renovable. La biomasa sólida puede ser convertida en combustible gaseoso en un gasificador. Este biogás puede ser quemado en conjunto con madera (u otro combustible) en una caldera generadora de vapor o usado para operar una turbina a gas convencional. El biogás puede ser también creado por la digestión de desechos de comida o animales en la ausencia de oxígeno – digestión anaeróbica. Los gases combustibles producidos por la biomasa pueden ser empleados para generar electricidad en una turbina a gas, o en una unidad de generación de ciclo combinado. (González-Longatt, 2004)

El etanol producto del maíz, posee un costo estimado de 1.10 US\$/Galón. Debido a que el galón de etanol posee menos energía que un galón de gasolina, debe ser multiplicado por un factor de 1.5 para hacer una comparación, esto significa que si el costo del etanol es 1.10US\$/galón el costo para producir el equivalente en energía a un galón de gasolina es 1.65US\$/galón, siendo el precio comercial promedio de la gasolina 0.90US\$/galón. Una barrera principal que afronta la producción comercial biodiesel es el costo de producir el combustible. La consecución de semilla del aceite, el transporte, el almacenaje y la extracción del aceite representan al menos el 75% del costo de producir biodiesel. El costo estimado de producir biodiesel es 2.56 US\$/galón de éster de metilo a partir de semilla de colza. Estimaciones recientes apuntan que el coste de producción en la gama de 1.30 US\$/galón (usando la grasa superflua) a 2.00 US\$/galón o más cuando se usa el aceite de soja. Un combustible mezclado del 20% biodiesel y el gasoil del 80% de petróleo podría reducir el costo de producción a aproximadamente 1.10 US\$/galón, asumiendo un costo diésel de petróleo de 90¢ US\$/galón.

1.1.5 Energía Eólica

La energía eólica es la fuente de energía de mayor crecimiento en el mundo. Hacia finales del año 2002, la capacidad instalada de generación eólica era

aproximadamente de 17.500 MW, suficiente para generar alrededor de 34 billones de kWh al año de electricidad. En el 2013, la capacidad mundial instalada de energía eólica fue de 318 gigavatios. En 2011 la eólica generó alrededor del 3 % del consumo de electricidad mundial. Dinamarca genera más de un 25 % de su electricidad mediante energía eólica, y más de 80 países en todo el mundo la utilizan de forma creciente para proporcionar energía eléctrica en sus redes de distribución, aumentando su capacidad anualmente con tasas por encima del 20 %. En España la energía eólica produjo un 21,1 % del consumo eléctrico en 2013, convirtiéndose en la tecnología con mayor contribución a la cobertura de la demanda, por encima incluso de la energía nuclear. (EIPaís, 2013, González-Longatt, 2004)

La tecnología eólica es limpia y renovable que se ha incrementado en popularidad con los consumidores y las políticas del mercado. En respuesta, las empresas eléctricas han desarrollado nuevas plantas de viento que consisten de muchas turbinas de viento. Cuando la velocidad del viento se incrementa, el valor de la electricidad generada aumenta exponencialmente. Debido a los vientos rápidos, menos turbulentos son encontrados en alturas sobre el terreno, los nuevos aerogeneradores están ubicados en torres de algunos cientos de pies de altura.

Un sistema eólico, posee una eficiencia mecánica por encima del 22%, llegando hasta una eficiencia aerodinámica que ronda el 40%. Aunque diseños particulares pueden maximizar el coeficiente de potencia y en consecuencia la eficiencia del sistema. La relativa baja eficiencia de este sistema de generación proviene de sus fundamentos aerodinámicos. La ley de Betz dice que sólo puede convertirse menos de $16/27$ (el 59 %) de la energía cinética en energía mecánica usando un aerogenerador.

La energía eólica alcanzó la paridad de red (el punto en el que el coste de esta energía es igual o inferior al de otras fuentes de energía tradicionales) en algunas áreas de Europa y de Estados Unidos a mediados de la década de 2000. La caída de los costes continúa impulsando a la baja el coste normalizado de esta fuente de energía renovable: se estima que alcanzó la paridad de red de forma general en todo el continente europeo en torno al año 2010, y que alcanzará el mismo punto

en todo Estados Unidos en 2016, debido a una reducción adicional de sus costes del 12%.(WWEA, 2010)

Otro informe de la Asociación Británica de la Energía Eólica (*British Wind Energy Association*) estima un coste de generación medio para la eólica terrestre de 5-6 céntimos de dólar por kWh (2005). El coste por unidad de energía producida se estimaba en 2006 como comparable al coste de la energía producida en nuevas plantas de generación en Estados Unidos procedente del carbón y gas natural: el coste de la eólica se cifraba en \$55,80 por MWh, el del carbón en \$53,10 por MWh y el del gas natural en \$52,50. Otro informe gubernamental obtuvo resultados similares en comparación con el gas natural, en el Reino Unido durante el año 2011.(Cardwell, 2014)

En febrero de 2013 *Bloomberg New Energy Finance* informó que el coste de la generación de energía procedente de nuevos parques eólicos en Australia es menor que el procedente de nuevas plantas de gas o carbón. Al incluir los cálculos, el esquema de precios actual para los combustibles fósiles, sus estimaciones indicaban unos costes (en dólares australianos) de \$80/MWh para nuevos parques eólicos, \$143/MWh para nuevas plantas de carbón y \$116/MWh para nuevas plantas de gas. Este modelo muestra además que "incluso sin una tasa sobre las emisiones de carbono (la manera más eficiente de reducir emisiones a gran escala) la energía eólica es un 14% más barata que las nuevas plantas de carbón, y un 18% más que las nuevas plantas de gas.(Cardwell, 2014)

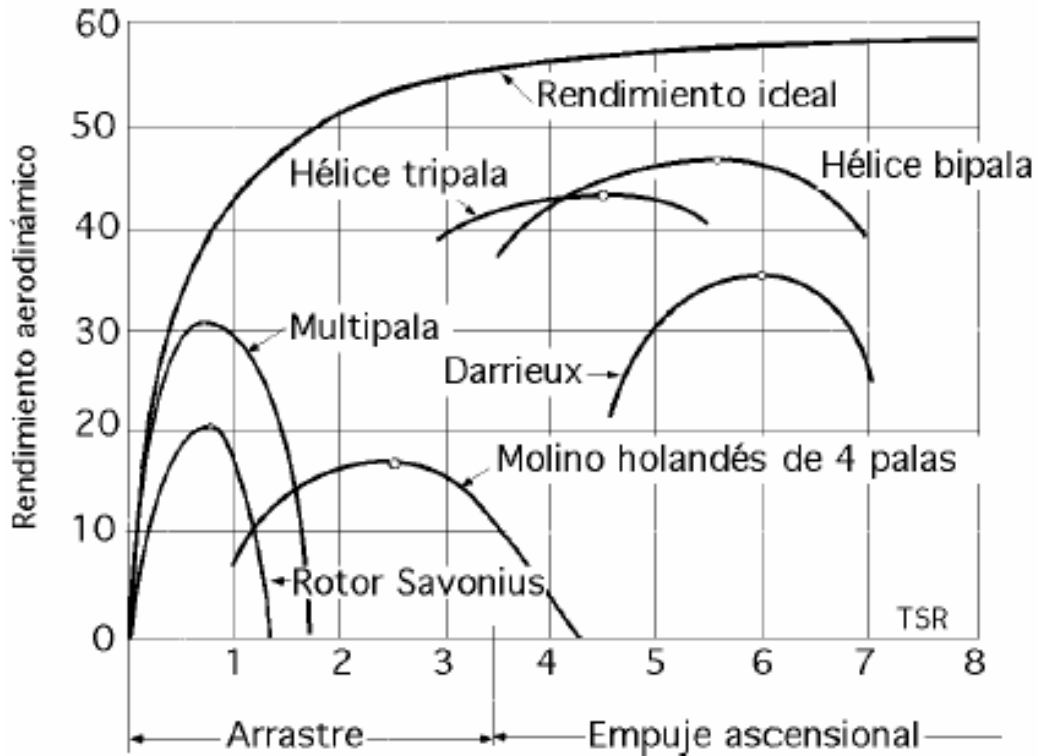


Figura 1. Eficiencia de Generadores Eólicos. (González-Longatt, 2004)

1.1.6 Motor Stirling

Los motores Stirling, son clasificados como motores de combustión externa. Es un sistema sellado dentro de un fluido de trabajo inerte, usualmente helio o hidrogeno. Generalmente son encontrados en pequeños tamaños (1-25kW) y están siendo actualmente producidos en pequeñas cantidades para aplicaciones especializadas. El reciente interés de una FGD, de uso para la industria espacial y marítima, ha revivido el interés por el motor Stirling y ha resultado, en un aumento en los esfuerzos de investigación y desarrollo. Uno de los esfuerzos de desarrollo está orientado a las aplicaciones de discos solares –calor reflejado de los colectores concentradores solares es usado para alimentar un motor Stirling.

Los motores Stirling han estado disponibles por un gran tiempo, no solo en pequeña cantidades sino en aplicaciones especializadas. Por lo tanto, los datos de rendimiento sobre motores Stirling son difíciles de obtener. La energía de un motor Stirling térmico (STM: *Stirling Thermal Motor*) posee una unidad de 25 kW con una real eficacia eléctrica de aproximadamente el 30 %, aunque el objetivo es que se

aumente esta eficacia al 34 % con más desarrollo. Otras empresas reportan eficiencias eléctricas de motores Stirling corriente están en el rango de 12 a 30%. El objetivo es que se aumente esta eficacia al 34 % con más desarrollo.

1.1.7 Motores de Combustión Interna (MCI)

Los motores reciprocantes, o a pistón, es la más común y técnicamente madura tecnología de Generación Distribuida. También son llamados motores de combustión interna (*IC: internal combustion*). Los motores reciprocantes requieren combustible, aire, compresión y una fuente de combustión para trabajar. Dependiendo de la fuente de ignición ellos se agrupan en dos categorías: (1) motores de ignición por chispa (*SI: spark ignited*), típicamente emplean la gasolina o el gas natural como combustible, o (2) motores de ignición por compresión (*CI: compression ignition*), típicamente trabajan con combustible diésel. Los motores reciprocantes comercialmente disponibles están en un rango de potencias de 0.5kW a 6.5 MW. Ofrecen un bajo costo de capital, fácil instalación, proveen confiabilidad, una muy buen característica de seguimiento de la carga y la posibilidad de recuperación de calor. Las posibilidades de aplicación de los motores reciprocantes incluye: generación primaria o continua, *peak shaving*, respaldo, *Premium power*, generación remota y generación en *stand-by*. Los motores pueden operar con combustible generado por tratamiento de desechos (metano) y otros biocombustibles (*biofuel*). (González-Longatt, 2004)

Los motores reciprocantes pueden operar con un amplio espectro de combustibles incluyendo el gas natural, diésel, gas de desecho, biogases, etc. Los motores de tamaño grandes pueden durar 20-30 años mientras motores más pequeños (<1MW) tienden a tener vidas útiles cortas. Los motores reciprocantes poseen eficiencias en un rango entre 25 a 45%. En general los motores diésel son más eficientes que los motores a gas natural, debido a que ellos operan a mayor relación de compresión. En particular, la eficiencia de los motores a gas natural se espera que se mejore y se aproxime a la de los motores diésel. Las emisiones descontroladas de NOx de los motores reciprocantes (especialmente motores diésel) son las más altas de todas las tecnologías de Generación Distribuida (GD).

Los motores de combustión interna son la tecnología tradicional para plantas de emergencia en todo el mundo. Ellos poseen el más bajo costo inicial de todas las tecnologías de GD. El costo de capital de un conjunto de motor-generador tiene un paquete que varía en un rango desde los 300US\$/kW a los 900US\$/kW, dependiendo del tamaño, tipo de combustible, y el tipo de motor. El costo del motor en general (US\$/kW) incrementa con el tamaño. El costo total de instalación puede ser 50- 100% más que el costo del motor mismo, los costos adicionales incluyen los balances de los equipos de la planta, honorarios de instalación, honorarios de la ingeniería, y otros gastos de dueño. El gas natural es usualmente menos costoso que el combustible diésel para el mismo contenido de calor. Si el motor de combustión interna es para ser usado un gran número de horas por año, el costo total de operar la unidad a gas puede ser más bajo. El gas natural puede no estar disponible en todas las localizaciones, mientras que el diésel puede ser transportado donde sea. Sin embargo, el motor diésel tiene unas emisiones contaminantes altas, de modo que su uso puede ser restrictivo en algunos lugares con normativas ambientalistas severas. El costo de mantenimiento de un motor combustión interna a gas y de diésel varía entre 0.007- 0.015 US\$/kWh y 0.005- 0.010 US\$/kWh, respectivamente. (González-Longatt, 2004, Preciado and Piña., 2011)

Tabla 3. Características de Eficiencia de algunos Motores de Combustión Interna. (González-Longatt, 2004)

Característica de Eficiencia	MAN 100 kW	Cummings GSK19G 300 kW	Caterpillar G3516 LE 800 kW	Caterpillar G3616 LE 3 MW	Wartsila 5238 LN 5 MW
------------------------------	------------	------------------------	-----------------------------	---------------------------	-----------------------

Capacidad Eléctrica Nominal (kW)	100	300	800	3000	5000
Costo Total Instalado (US\$/kW)	1515	1200	1000	920	920
Heat Reat Eléctrico (BTU/kWh)	11147	10967	10246	9492	8758
Eficiencia Eléctrica (%)	30.6	31.1	33.3	36	39
Velocidad del motor (rpm)	1800	1800	1200	900	720
Entrada de Combustible (MMBTU/h)	1.11	3.29	8.20	28.48	43.79
Presión de gas Requerida (psig)	<3	<3	<3	43	65

1.1.8 Sistemas de almacenamiento

Las tecnologías de almacenamiento de energía no producen energía neta a la red, solo pueden proveer energía eléctrica sobre periodos de tiempo cortos. Estos son usados para corregir el voltaje, cuando las empresas eléctricas o los consumidores interrumpen el suministro o cargas. Estos también pueden ser empleados como fuente ininterrumpida de energía (UPS). Como tal, las tecnologías de almacenaje de energía, como se considera, son un recurso de energía distribuida.

- Almacenaje de Batería (Battery Storage).
- Volantes (Flywheel).
- Superconductores Magnéticos de Almacenamiento de Energía (SMES: Superconducting Magnetic Energy Storage).
- Super-capacitor (Supercapacitor).

- Almacenamiento de Energía por Aire Comprimido (CAES: Compressed Air Energy Storage).

La eficiencia y el ciclo de vida son dos importantes parámetros a considerar junto con otros parámetros antes de seleccionar una tecnología de almacenamiento. Ambos parámetros afectan el costo total. La baja eficiencia incrementa el costo de energía efectiva, y el bajo ciclo de vida incrementa el costo total, ya que el sistema ha de ser reemplazado más frecuentemente. (González-Longatt, 2004)

Mientras que el costo de capital es un parámetro importante, se debe considerar seriamente el costo total (incluyendo el impacto de la vida del equipo, y los costos de O&M) ya que este es un indicador más real para el análisis económico. Por ejemplo, mientras el costo de capital de las baterías de plomo-acido es relativamente bajo, ellas no son la opción más económica para la administración de la demanda (seguimiento de la demanda) debido a su relativamente corta vida útil para esta aplicación. El costo de un sistema completo de UPS puede variar entre 200US\$/kVA a 1500US\$/kVA.

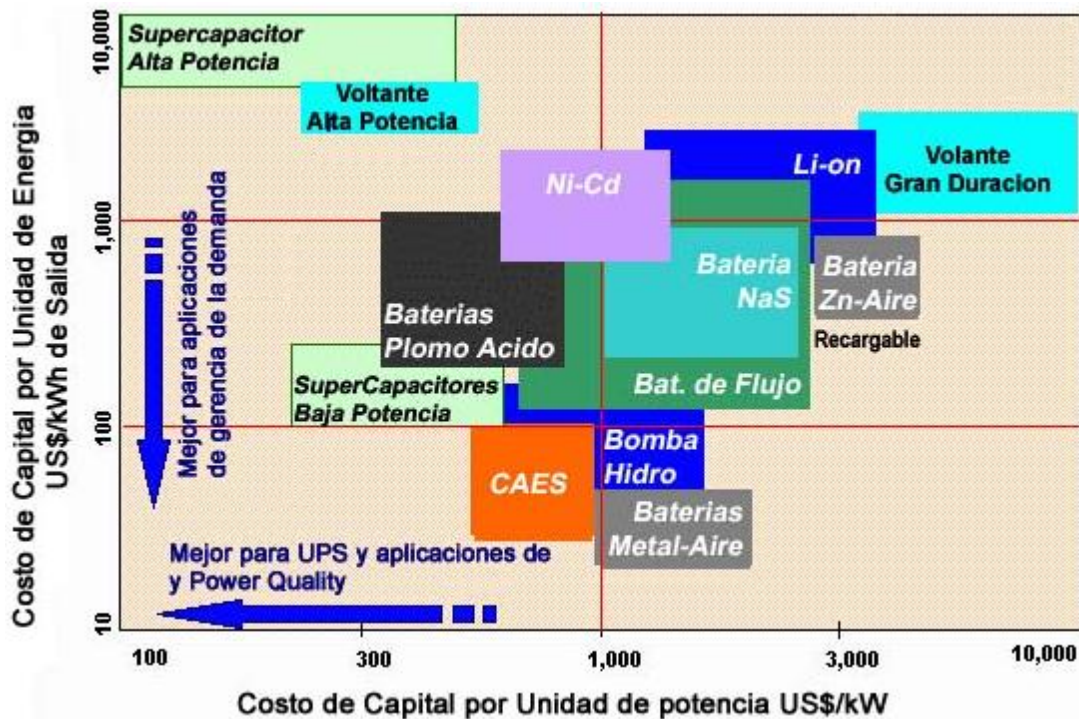


Figura 2. Eficiencia de los Sistemas de Almacenamiento. (González-Longatt, 2004)

1.2 Generación Distribuida en Cuba

En Cuba la Generación Distribuida no es algo nuevo, ya que la industria azucarera tiene un pequeño grupo de generadores insertados, pero con carácter cíclico, los cuales no constituyen un por ciento muy elevado de la producción de energía del país.

Dicho ministerio, con el empleo de la biomasa cañera, tiene relevancia aunque solo parcialmente por la duración limitada de la contienda azucarera.

Sin embargo, con la creciente inserción de máquinas tanto en número como en potencia, así como con la extensiva utilización de unidades emergentes en horarios picos, el sistema se va transformando y su comportamiento de estado estable, como dinámico puede variar.

Una alternativa para disminuir el costo de la GD es la utilización de generadores asincrónicos o de inducción según se ha estudiado en el Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente de la Universidad de Cienfuegos.

En Cuba se extiende la generación fotovoltaica, eólica e hidráulica. En el presente existe un crecimiento de la cogeneración, particularmente en los cayos e islotes para el servicio hotelero, centros turísticos y de apoyo vinculados a esta actividad, donde en un futuro puede utilizarse la refrigeración por absorción y obtener frío, calor y energía eléctrica a partir de un único combustible, procedimiento de elevada eficiencia conocido como trigeneración. (López, 2009)

En nuestro país se ha implementado un programa a largo plazo que estimula el uso de este tipo de generación, a diferencia de lo señalado anteriormente, se ha concebido la inserción de diferentes fuentes renovables pensando siempre que Cuba posee grandes proyectos alrededor del uso de fuentes alternativas de producción de energía eléctrica. Esto está estimulado por el envejecimiento de las grandes centrales eléctricas, los impactos ambientales por nuestra situación geográfica y por la factibilidad desde el punto de vista de la defensa civil y militar. En general en la política que se está llevando a cabo en el territorio nacional alrededor del tema de la Generación Distribuida, ya existen reglamentos, manuales, métodos y normas para la interconexión de emplazamientos de baterías de generadores movidos con motores primarios de combustión interna

usando como combustible el Diésel, las cuales trabajan como respaldo y luego, ya en la segunda etapa, instalaciones más potentes de régimen permanente con Fuel Oil, y se trabaja en la elaboración de procedimientos de explotación técnica y económica de una unidad específica dentro de una planta o de la planta como tal. En Cuba se realiza un esfuerzo por contribuir a establecer una política nacional de energía sustentable. (López, 2009)

En nuestro país se decide la instalación de Grupos Electrógenos, porque la construcción de nuevas termoeléctricas, además de una mayor inversión inicial, llevaría entre 5 y 10 años. En esos momentos el país atravesaba una crisis energética considerable y tenía una gran carga política dado el descontento que esto causaba a la población y a las esferas productivas del país. Ante esta situación se necesitaba una fuente de energía de rápida instalación y fácil explotación. Negativamente no se consideraron los costos futuros un mantenimiento y explotación que estas tecnologías traían consigo, mucho más caras que otras fuentes energéticas. También en nuestro país los ciclones tropicales tenían un papel protagónico año tras año, por lo que fue un detonante para la instalación de dichas fuentes de Generación Distribuida.

1.2.1 Reseña Histórica

Con la entrada en funcionamiento, en 1973, de las dos primeras líneas de Transmisión a 220, kilovoltios, con una longitud total de 275 km, se inauguró el Sistema electro energético Nacional (SEN). Estaba destinado a interconectar la generalidad de las plantas eléctricas importantes del país, entre ellas, las de todos los centrales azucareros de la isla. La capacidad total interconectada llegó en 1980 a 2 212 MW, y en 1992 a 3 676 MW. En el 2004 el SEN tenía una capacidad instalada de 4 048 MW, de estos, el 79% era generado por unidades de la UNE, aumentando el % de energía eléctrica obtenida por cogeneración. De estos 4 048 MW solo el 1,58% era aportado por generación distribuida, el 10,12% por ENERGAS y el resto por las centrales térmicas del país. Dada la situación crítica que se llegó en los años 2004 y 2005 con relación al servicio eléctrico, las continuas interrupciones del servicio eléctrico (falta del fluido eléctrico) y la mala

calidad del servicio, en el marco de la Revolución Energética se decidió realizar una importante inversión para poner freno a esta situación y rescatar los niveles de generación de forma rápida, sustituyendo las grandes centrales térmicas por numerosos Grupos Electrógenos (GE).

La 1ra etapa consistió en la instalación de baterías de grupos electrógenos, de alta calidad y eficiencia suministrados por firmas prestigiosas. En menos de dos años de intenso trabajo, se instalaron más de 1 400 MW que son generados de forma distribuida por Grupos Electrógenos Diésel MTU en 116 de los 156 municipios del país, además de los instalados en puestos claves como hospitales y fábricas. Posteriormente se dio paso a la 2da etapa del proceso con la instalación de grupos de mayores potencias de Fuel Oil, tecnologías HYUNDAI y MAN, hasta cubrir una capacidad instalada de alrededor 1 752 MW (Fuel Oil). (Martínez, 2014)

1.3 Descripción de algunos de los motores utilizados en la Generación Distribuida

Luego de consultar la bibliografía correspondiente, se arribó a la conclusión que los motores más utilizados en la Generación Distribuida son:

- Hyundai HIMSEN 9H21/32
- Motor MAN 18V 28/32 S
- Motor MTU Serie 4000 modelo 16 V 4000 G81
- Motor MAN B & W 18 V 48/60
- Motor MAN B & W 16 V 32/40
- Motor MAN B & W 18 V 51/60
- Motor de GAS GE Jenbacher tipo J 620 F 111

1.3.1 Motor Hyundai HIMSEN 9H21/32

El motor es del tipo Hyundai HIMSEN 9H21/32 de cuatro tiempos, con turbo cargador y refrigeración interna. La inyección se realiza de forma vertical y directa. La dirección de rotación del motor se realiza en sentido de rotación de las manecillas del reloj visto del lado del generador eléctrico, este sentido de rotación del motor es irreversible producto a la acción del generador eléctrico. El motor está

formado por nueve cilindros configurados en línea, la velocidad de operación es de 900rpm (repeticiones /minutos). La potencia por cilindros se de 200KW por lo que el motor cuenta con una potencia de 1.8 MW. El diámetro de los cilindros es de 210mm, el desplazamiento del pistón es de 320mm y el volumen barrido por un solo cilindro es de 11.1 dm³. El promedio de velocidad del pistón es de 9.6 m/s, la presión media eficaz es de 24.1bar, la relación de compresión es de 17:1 y el orden de encendido de los cilindros es 1 – 3 – 5 – 7 – 9 – 8 – 6 – 4 – 2. El comportamiento del motor varía dependiendo de la condición de la operación y la condición del motor. Por lo tanto, es recomendado grabar el comportamiento del motor con frecuencia, por lo menos semanalmente, lo cual proveerá una guía fiable para mejor servicio y mantenimiento. Un análisis de tendencia continúa en referencia a los datos grabados del resultado de prueba del fabricante del motor y los datos comisionados, contribuirán para diagnosticar la condición del motor precisamente y las precauciones o prescripciones pueden hacerse fácilmente. (Cheonha-Dong)

Tabla 4. Principales características de las unidades de generación Hyundai HIMSEN 9H21/32. (Cheonha-Dong)

Parámetro	Especificación
Tipo de Motor	HIMSEN Hyundai 9H21/32
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 del motor	50 ton
Longitudes del motor	2.4x3.4x12 m
Consumo de combustible	187-193 g/kWh
Relación de compresión	17:1
Potencia	1710 kW
Tiempo de mantenimiento	12000 h
Frecuencia	60 Hz

Tabla 5. Parámetros principales del motor Hyundai HIMSEN 9H 21/32. (Cheonha-Dong)

Motor HIMSEN Hyundai	
Potencia Activa por cilindro	50-100kW
Velocidad Turbo.	<4092
Velocidad Motor.	891-909rpm
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 - 0.9 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 a 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	3 -5bar

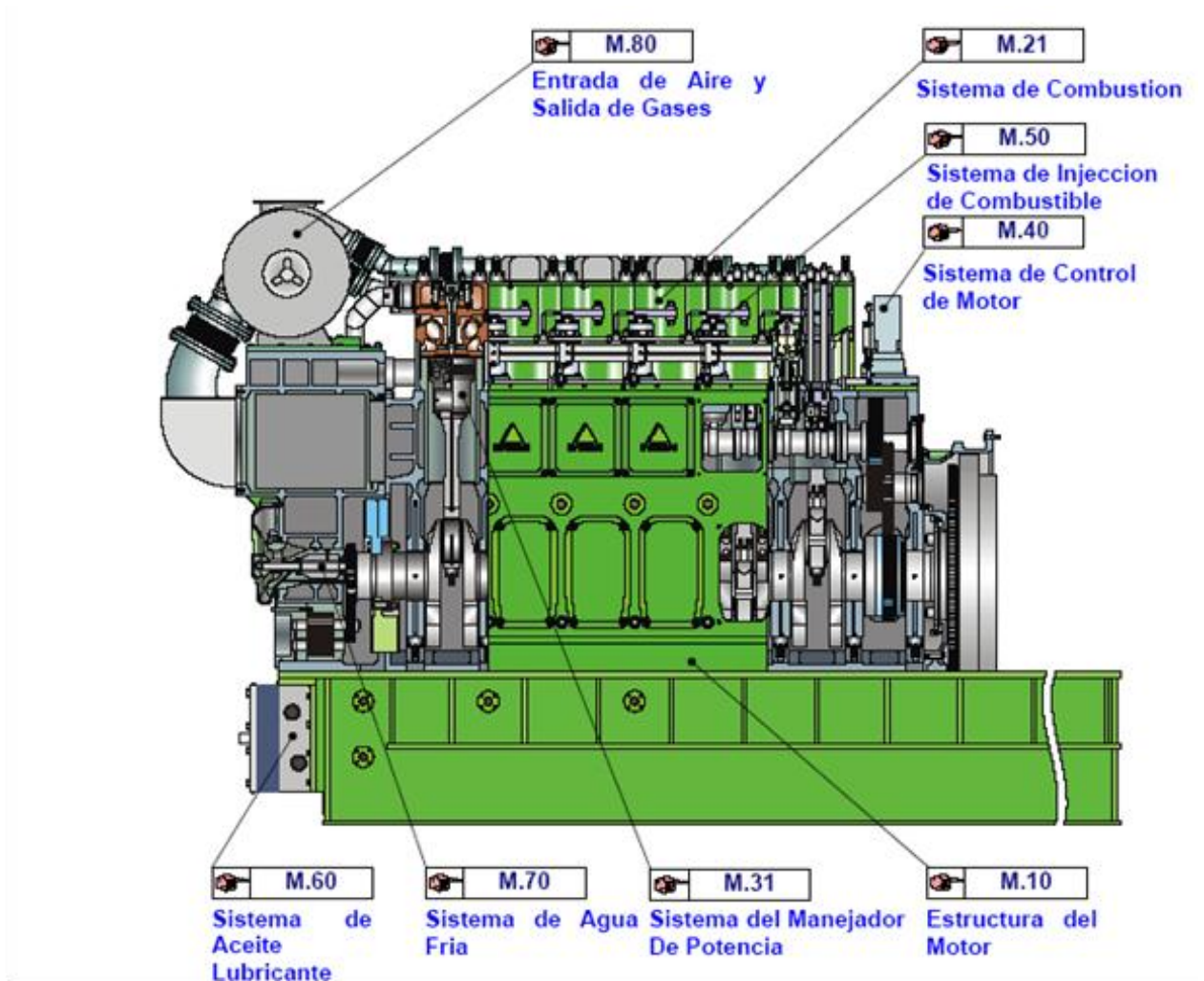


Figura 3. Representación del motor Hyundai HIMSEN 9H 21/32. (Río, 2014)

1.3.2 Motor MAN 18V 28/32 S

El grupo MAN es una empresa europea líder en la fabricación de motores y vehículos, con un total de ventas anuales de 16 billones de Euros. MAN, fue nombrado con las primeras iniciales de la compañía predecesora llamada MzschNenfabrikAugsburg- Nurnberg (Augsburg-Nurnbergmachineryplant). En su mayor parte de las áreas centrales, no sólo los aspectos técnicos sino la parte comercial, el grupo MAN está en una posición líder y produce motores MAN con una garantía de calidad globalmente uniforme y un servicio excelente en una amplia red nacional. Esta compañía está relacionada con muchas industrias, ya

que grupo MAN es reconocido por ser el primero en inventar el motor diésel en el mundo.

Por otra parte los motores MAN instalados en el país, son máquinas de 4 tiempos cuya configuración es en V con una disposición de cilindros de 12-16-18 y gama de potencia de 2700 a 4230 kW, velocidad de rotación: 720-750 rpm, diámetro interior de los pistones 280 mm y una carrera de 320 mm, por cada cilindro con una cilindrada de 19,7 litros, relación de compresión de 13.9:1, presión de compresión máxima de 145 bar son motores sobrealimentado, cuyo principio de turbo es Sistema de presión constante con enfriador intermedio, aceptan una calidad del combustible hasta 700 cSt/50° C según (BSMA 100-M9), las potencias por cilindros van desde 225-235kW y la velocidad de los cilindros desde 7.7-8m/s. El block o bastidor es la porción principal del motor, está hecho en hierro fundido nodular y está diseñado de manera que el espacio vacío entre los dos bancos de cilindros se utiliza como un receptor de aire de carga. Los dos bancos de cilindros en forma de una V están arriostrados en la cima por una plancha pesada encima, y en el fondo por una brida y dos paredes laterales longitudinales ensamblados en forma de caja donde se localiza el circuito de alta temperatura (AT), dentro del cual se encuentran unos tubos huecos denominados camisas de cilindros, en los que los pistones se deslizan alternativamente de arriba hacia abajo, fabricadas de fundición perlítica de grano fino. Entre la camisa y la culata de cilindro y entre la camisa y el bastidor hay anillos de estanqueidad reemplazables hechos de fundición, permitiendo el sellaje del líquido refrigerante, el cual debe ser tratado para evitar posibles fenómenos de corrosión, si no se puede obtener agua deionizada, destilada o agua potable cuya dureza no exceda los 9° dH (grados alemanes de dureza) el aceite lubricante es conducido por aberturas que llegan a las partes móviles, propiciando la lubricación de las mismas. El pistón es de enfriamiento con aceite y de tipo monobloque, hechos de hierro fundido nodular, están equipados con 3 anillos de compresión y 1 aro rascador, logrando sellar los gases en combustión y aprovechar la mayor cantidad de energía que sea posible, además de controlar el consumo de aceite. La biela es estampada a presión, en su cabeza tiene una junta inclinada para facilitar la extracción el bloque de pistón y

biela a través de la camisa de cilindro. Las superficies de unión en la biela y tapa del cojinete están melladas para asegurar su posición precisa y prevenir un movimiento relativo de las piezas, tiene canales taladrados para suministrar aceite al ojo del pie de biela, el cojinete de la cabeza es de tipo trimetálico revestido de una cobertura de rodamiento. El árbol de levas A y B, uno para cada banco de cilindros, se contienen en casquillos de cojinetes, los cuales están fijados en orificios del bastidor del motor, encontrándose bloqueado cada cojinete por medio de un tornillo que está insertado en el bastidor del motor, están montados en secciones, una para cada cilindro, y las secciones están ensambladas por medio de pernos. Cada sección está equipada con levas fijas para la operación de la bomba de inyección de combustible, válvula de admisión de aire y válvula de escape respectivamente.

Los engranes de sincronización o intermedios se emplean en la unión del conjunto eje del cigüeñal, árbol de levas, los sistemas de encendido y otros accesorios, de manera que todos los sucesos ocurran al mismo tiempo. El cigüeñal tiene la función cambiar el movimiento lineal del pistón en movimiento giratorio, es de forja en una sola pieza, está suspendido de soportes colgantes. Los cojinetes principales son de tipo trimetálico y están cubiertos de una capa de rodamiento. Para lograr una presión y un nivel de vibración, los que sean apropiados, está dotado de contrapesos, los cuales se sujetan al cigüeñal por medio de acoplamientos en cola de milano y están asegurados con un tornillo situado al medio. Sirve como distribuidor de lubricante al transportar por sus agujeros aceite proveniente de las aberturas en los cojinetes principales descargarlo por medio de los muñones hacia otros componentes. El volante almacena la energía y suaviza los pulsos de fuerza de los pistones. Mediante él se puede transmitir fuerza a otro equipo, en este caso al generador. El amortiguador de vibraciones consiste fundamentalmente en un volante pesado encapsulado en una funda ligera. Se admite una pequeña holgura entre la funda y el volante y este espacio se llena de un líquido de alta viscosidad. La funda está rígidamente unida al extremo delantero del cigüeñal del motor y la única conexión entre el cigüeñal y el volante del amortiguador se realiza por medio del líquido.

En caso de altas vibraciones la funda se desplaza exponiendo la película de líquido viscoso a una acción de cizallamiento, siendo la energía de vibraciones absorbida y manifestándose como calor. El Bastidor de Base: El motor y el alternador están montados sobre un bastidor de base común. La estructura rígida del bastidor de base está empotrada en el alojamiento del motor mediante soportes resilientes. El interior del bastidor de base forma un depósito para el aceite lubricante del motor. (MANB&W)

Tabla 6. Principales características de las unidades de generación MAN 18V 28/32S. (MANB&W)

Parámetros	Valor nominal
Tipo de Motor	18V28/32 S
Rango de velocidad	720 rpm – 750 rpm
Potencia por cilindro	225 KW
Diámetro interior	280 mm
Carrera del pistón	320 mm
Área del pistón por cilindro	616 cm ²
Velocidad media del pistón	7.7 m/s
Radio de compresión	13.9
Peso del motor seco	70.8 ton
Longitud del motor	6626 mm
Tipo de generador	AMG 0900SK 10 DSE
Voltaje	13800 V
Corriente	204 A
Frecuencia	60 Hz

Tabla 7. Parámetros nominales del sistema de escape del motor MAN 28/32S. (MANB&W)

Sistema	Descripción	Rango normal de operación	Valor de alarma
Gas de escape y aire de carga	Temperatura del aire de carga después del enfriador.	55~ 75 °C	
	Temperatura de los gases de escape del cilindro	300 a 400°C	470°C
	Temperatura de gases de escape a la entrada del turbo compresor	425 ~ 475°C	>570°C
	Temperatura de gases de escape a la salida del turbo compresor	275~350°C	450°C
Sistema de aire comprimido	Presión de entrada al motor.	8~10 bar	8.5 bar

1.3.3 Motor MTU 4000 16V G81

Los motores diésel MTU están diseñados para suministrar energía eléctrica al sistema eléctrico, alimentándolo parcialmente o entregando toda la energía a la red. Realizan dicha función utilizando, entre otros componentes, los grupos motor-generator. Son del tipo MTU Serie 4000 modelo 16 V 4000 G81 con 16,4 ton de peso. El nombre Motor de Velocidad Media de Alta Tecnología y corresponde a la fábrica que diseñó este motor perteneciente a la compañía MTU. La designación del modelo 16 V 4000 G81 que posee cilindros que trabajan en V, el diámetro de los cilindros es 19 cm, la carrera del pistón es 4,06 litros y que es un motor estacionario. Cuentan con un diseño contenedorizado, son capaces de trabajar a una temperatura que oscila entre -54 °C (219K) y 80 °C (353K). En Cuba estos motores laboran a una temperatura promedio de 32 °C (305K) 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 1 900 kW y su velocidad nominal de 1 800 rpm. 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 de los dispositivos para el mantenimiento. Su sistema de alimentación es completamente modularizado con accesibilidad directa. Se le inserta el concepto del mantenimiento “Cada Parte” y “Unidad del Cilindro” por lo que hace que sean prácticos y confiables.

La posición de los cilindros es en V, el volumen de barrido por el cilindro es de 4,06 a 4,69 litros (m^3) y la relación de compresión es de 15,5. La dirección de rotación del motor es a favor de las manecillas del reloj visto desde el lado del volante. Su sistema de distribución está compuesto por un árbol de levas, un engrane libre, dos bombas de agua de alta y baja temperatura acopladas al cigüeñal y por último una bomba de lubricación. La cantidad de cilindros es 16, 150 kW de potencia y 22 bar (2200 kPa) de presión efectiva. El aire caliente por el funcionamiento del motor es obligado a salir a la atmósfera por 3 ventiladores de tiro inducido de una capacidad de 10 200 m^3/h de flujo de aire cada uno, sumando entre ambos un caudal de 30 600 m^3/h de aire y el turbo compresor consume parte del aire de admisión del motor. (Río, 2014)

Tabla 8. Principales características de las unidades de generación MTU 16V 4000 G81.(Río, 2014)

Parámetros	Valor nominal
Tipo de Motor	16 V 4000 G81
Velocidad Nominal	1800 rpm
Potencia por cilindro	150 kW
Diámetro interior	190mm
Carrera del pistón	220mm
Cilindrada	4.06 lts.

Velocidad media del pistón	m/s
Radio de compresión	15.5:1
Peso del motor seco	16.4 ton
Tipo	MJB 500 de 4 polos
Voltaje Nominal	13000 V
Corriente Nominal	295.1 A
Frecuencia	60 Hz
Potencia Nominal	1700kW

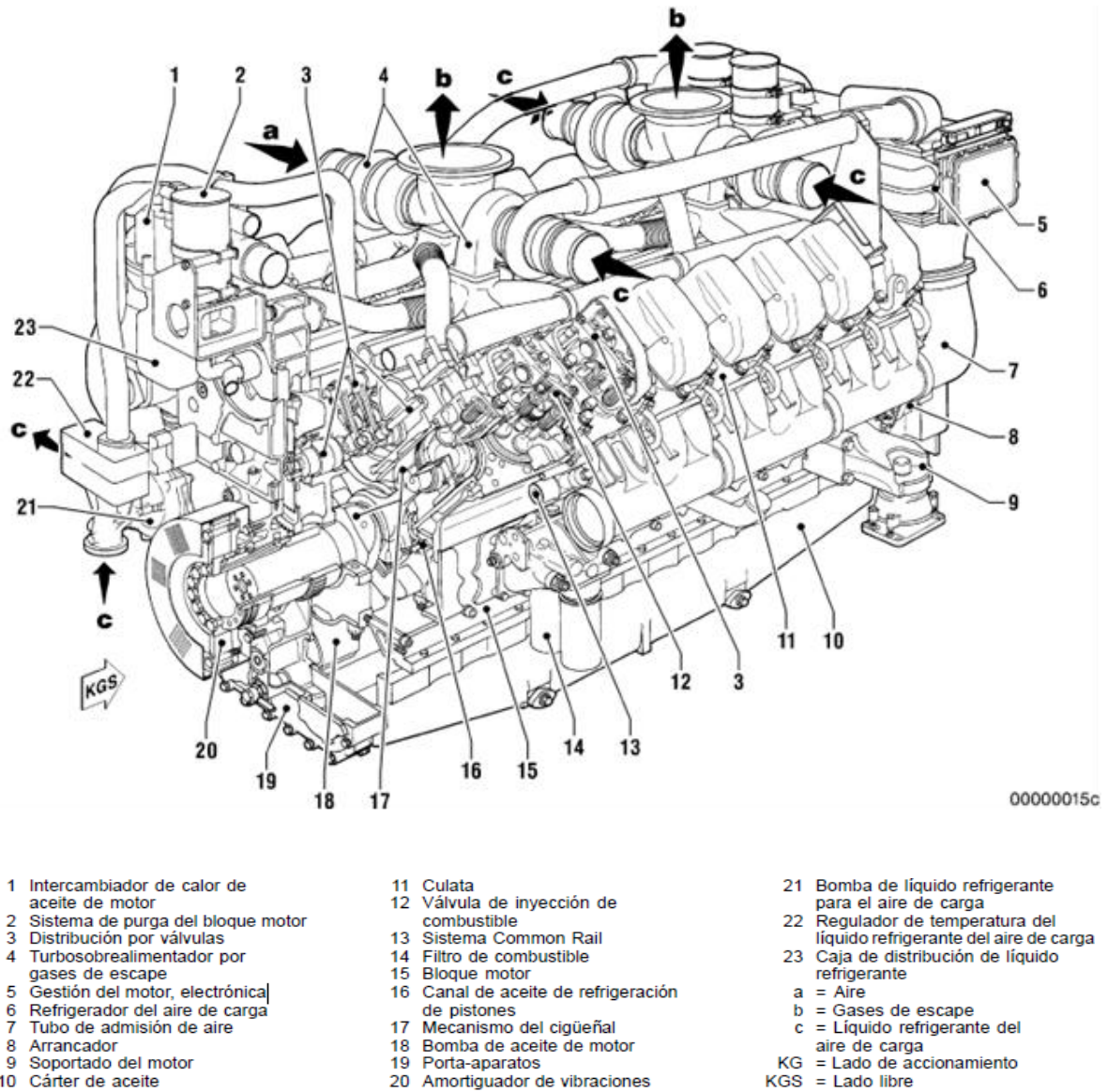


Figura 4. Partes del motor MTU 4000 16 V G81. (Río, 2014)

Los tres motores referenciados anteriormente son los empleados en la Central Eléctrica de Cayo Santa María. A continuación se muestran otros modelos de motores también utilizados en la Generación Distribuida.

1.3.4 Motor MAN B & W 18 V 48/60

Motor estacionario MAN de 18 cilindros, ciclo de cuatro tiempos y turbo cargador, enfriamiento por aire y rotación horaria.

Tabla 9. Principales parámetros del motor MAN B & W 18 V 48/60. (Martínez, 2014)

Fabricante	MAN B & W
Tipo de Motor	18 V 48/60
Diámetro del cilindro	480 mm
Carrera	600mm
Potencia continua (placa de características)	18.428 kW _e
Velocidad nominal	514 rpm
Tensión nominal	13.8 kV
Frecuencia nominal	60 Hz
Factor de Potencia nominal	0.8
Temperatura mínima	19 ° C
Temperatura máxima	38 ° C

1.3.5 Motor MAN B & W 16 V 32/40

Motor estacionario de 16 cilindros, diésel como combustible, cuatro tiempos, turbo cargador, enfriamiento por aire y rotación horaria.

Tabla 10. Principales parámetros del motor MAN B & W 16 V 32/40. (Martínez, 2014, MANB&W)

Fabricante	MAN B & W
Tipo de Motor	16 V 32/40
Diámetro del cilindro	320 mm
Carrera	400mm
Potencia continua (placa de características)	7.457 kW _e
Velocidad nominal	720 rpm

Tensión nominal	13.8 kV
Frecuencia nominal	60 Hz
Nominal Factor de potencia	0.8
Combustible	Fuel Oil (OC)

1.3.6 Motor MAN B & W 18 V 51/60

La diferencia principal de este motor es que emplea dos combustibles, consta de 18 cilindros, cuatro tiempos, turbo cargador, igualmente se enfría por aire y su giro es a la derecha.

Tabla 11. Principales parámetros del motor MAN B & W 18 V 51/60.(Martínez, 2014)

Fabricante	MAN B & W
Tipo de Motor	18 V 51/60
Diámetro del cilindro	510 mm
Carrera	600mm
Potencia continua (placa de características)	17.560 kWe
Velocidad nominal	514 rpm
Tensión nominal	13.8 kV
Frecuencia nominal	60 Hz
Nominal Factor de potencia	0.8
Combustible	Fuel Oil / Gas Natural

1.3.7 Motor a gas GE Jenbacher J 620 F 111

Tabla 12. Principales parámetros del motor a gas GE Jenbacher J 620 F 111. (Martínez, 2014)

Fabricante	GE Jenbacher
Tipo de motor	J 620 F 111
Principio de trabajo	4 tiempos
Configuración	V 60°
Número de cilindros	20
Diámetro	190 mm
Carrera	220 mm
Cilindrada	124,75 lit
Velocidad nominal	1500 rpm
Velocidad media del pistón	11,00 m/s

1.4 Eficiencia Energética

La eficiencia energética, entendida como la eficiencia en la producción, distribución y uso de la energía necesaria para garantizar la calidad total, es parte del conjunto de problemas que afectan la competitividad de las empresas o instituciones. La eficiencia energética implica lograr los requisitos establecidos por el cliente con el menor gasto energético posible y la menor contaminación ambiental por este concepto. Los análisis realizados en varias empresas por el Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente (CEEMA), de la Universidad de Cienfuegos, ponen de manifiesto el insuficiente nivel de gestión energética existente en muchas de ellas, así como las posibilidades de reducir los costos energéticos mediante la creación de las capacidades técnico-organizativas para administrar eficientemente la energía. Esto puede ser logrado si se aplica con eficacia un sistema de gestión energética. (Rodríguez., Rodríguez, 2010)

1.4.1 Sistema de gestión energética

La gestión energética o administración de energía, como subsistema de la gestión empresarial, abarca las actividades de administración y aseguramiento de la función gerencial que le confieren a la entidad la aptitud para satisfacer eficientemente sus necesidades energéticas, a partir de entender la eficiencia energética como el logro de los requisitos establecidos por el cliente con el menor gasto energético posible y la mínima contaminación ambiental por este concepto. Un sistema de gestión energética se compone de la estructura organizacional, los procedimientos, los procesos y los recursos necesarios para su implementación. (Rodríguez.)

1.4.2 Sistema de Gestión Total de Eficiencia Energética (SGTEE)

El Sistema de Gestión Total Eficiente de la Energía (SGTEE) 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. Este sistema se aplica a la UEB Cayo Santa María en el capítulo 2. (Rodríguez.)

1.4.3 Norma ISO 50001

Es una Norma Internacional voluntaria desarrollada por ISO (Organización Internacional de Normalización), brinda a las organizaciones los requisitos para los sistemas de gestión de energía, proporciona beneficios para las organizaciones grandes y pequeñas, en los sectores público y privado, en la manufactura y los servicios, en todas las regiones del mundo. ISO 50001 establece un marco para las plantas industriales, instalaciones comerciales, institucionales y gubernamentales, y organizaciones enteras para gestionar la energía. (ISO, 2011) ISO 50001 se basa en el modelo de sistema de gestión que ya está entendido y aplicado por organizaciones en todo el mundo. Puede marcar una diferencia positiva para las organizaciones de todo tipo en un futuro muy cercano, al mismo

tiempo que apoya los esfuerzos a largo plazo para mejorar las tecnologías de energía.

La norma tiene por objeto cumplir lo siguiente:

- Ayuda a las organizaciones a aprovechar mejor sus actuales activos de consumo de energía.
- Crear transparencia y facilitar la comunicación sobre la gestión de los recursos energéticos.
- Promover las mejores prácticas de gestión de la energía y reforzar las buenas conductas de gestión de energía.
- Ayudar a las instalaciones en la evaluación y dar prioridad a la aplicación de nuevas tecnologías de eficiencia energética.
- Promocionar un marco para promover la eficiencia energética a lo largo de la cadena de suministro.
- Facilitar la mejora de gestión de la energía para los proyectos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.
- Permitir la integración con otros sistemas de gestión organizacional, como es el ambiental, de salud y seguridad.(ISO, 2011)

1.5 Conclusiones parciales.

- La Generación Distribuida (GD) es utilizada en muchos países del mundo.
- Algunas de las tecnologías disponibles de GD son: las celdas de combustible, turbinas eólicas, paneles y colectores solares, motores de combustión interna, biofuentes de energía (biomasa).
- La GD tiene grandes ventajas sobre las tradicionales plantas de generación como son: menores pérdidas de transmisión, reducción de las emisiones de gases contaminantes, descongestión de los sistemas de transmisión, mayor fiabilidad del sistema, compensa el suministro de energía en períodos de gran demanda, etc.
- Los motores más utilizados en nuestro país son: Hyundai HIMSEN 9H 21/32, MAN 18V 28/32 S y MTU 4000 16V G81.
- El Sistema de Gestión Total Eficiente de la Energía (SGTEE) constituye un paquete de herramientas y procedimientos que cumplidos reducen los costos energéticos y brinda nuevas posibilidades de ahorro de energía en un empresa.
- La norma ISO 50001 proporciona beneficios en la disminución de los consumos de portadores energéticos para las organizaciones grandes y pequeñas, en los sectores público y privado, en la manufactura y los servicios, en todas las regiones del mundo.

CAPÍTULO 2. Sistema de Gestión Total de Eficiencia Energética (SGTEE) aplicado a la Central Eléctrica de Cayo Santa María.

Lo más importante para lograr la eficiencia energética en una empresa no es sólo que exista un plan de ahorro de energía, sino contar con un sistema de gestión energética que garantice el mejoramiento continuo. Es más importante un sistema continuo de identificación de oportunidades que la detección de una oportunidad aislada. Para el éxito de un programa de ahorro de energía resulta imprescindible el compromiso de la alta dirección de la empresa con ese propósito. Debe controlarse el costo de las funciones o servicios energéticos y no el costo de la energía primaria. El costo de las funciones o servicios energéticos debe controlarse como parte del costo del producto o servicio. También se deben concentrar los esfuerzos en el control de las principales funciones energéticas, organizar el programa orientado al logro de resultados y metas concretas, y realizar el mayor esfuerzo dentro del programa a la instalación de equipos de medición.

La creación de la UEB Cayo Santa María subordinada a la Unión Nacional Eléctrica surge como una fuerte alternativa económica ya que el país se encontraba pasando por una situación económica crítica. Ante esta coyuntura el Comandante en Jefe Fidel Castro Ruz, lanza una estrategia de desarrollo turístico para aprovechar la belleza de nuestras playas, valores naturales y paisajes, la tradicional hospitalidad del pueblo cubano así como la seguridad y confianza que como destino turístico podía ofrecerse.

Como parte de esta estrategia es que se crea el pedraplén más largo del país, para comenzar a desarrollar el turismo en la cayería norte de Villa Clara. El polo turístico que comenzaba a desarrollarse pretendía construir instalaciones para estos fines en Cayo Las Brujas, Ensenachos y Santa María.

La creación de la planta eléctrica está avalada por la Resolución 242 del 23 de julio del 2001 dictada por el Director General de la Empresa Eléctrica de Villa Clara en funciones en dicha fecha Ing. Silvio Dorta Herrera. Queda oficialmente inaugurada el 24 de octubre del 2001, encontrándose en Perfeccionamiento

Empresarial desde esa fecha según el Acuerdo 3867 del Comité Ejecutivo del Consejo de Ministros.

Su constante crecimiento va encaminado a la necesidad de satisfacer las necesidades de generación eléctrica para el sector turístico, de forma tal que permita establecer en este lugar una mayor cantidad de instalaciones hoteleras que permitan mayores ingresos al país.

La central propiamente dicha, que tiene la función de servir de planta reguladora de la frecuencia en el sistema – isla de abastecimiento de energía eléctrica a toda el área habitada de la Cayería Norte de Villa Clara, consta de dos motores MAN de 3.8 MW de potencia modelo 18V 28/32 S que trabajan con Fuel Oil, de encendido por compresión sobrealimentados y de cuatro tiempos, que cuentan con 18 cilindros cada uno dispuestos en V, y están acoplados a sendos generadores eléctricos de 10 polos y 60 Hz que trabajan a una velocidad sincrónica de 720 rpm. Otra parte del suministro de energía eléctrica se satisface con (12 motores MTU de 1,7 MW de potencia cada uno) modelo 16V 4000 G81 que trabajan con diésel, con encendido por compresión y con cuatro tiempos, estos poseen 16 cilindros en V y se encuentran acoplados a generadores eléctricos marca Marelli, modelo MJB 5000 de cuatro polos y 60Hz que operan a 1800 rpm. Para el apoyo a estos grupos se instalaron cuatro máquinas Hyundai HIMSEN 9H21/32 de cuatro tiempos, con una potencia de 1.7 MW de nueve cilindros en línea, acoplado a un generador de 10 polos, con una frecuencia de 60 Hz y 900 rpm. La planta posee una capacidad instalada de aproximadamente unos 38 MW, aunque la demanda oscila alrededor de los 19 MW.

Se encuentra localizada en el límite suroeste de dicho cayo, el cual constituye una de las unidades insulares del noreste de Villa Clara perteneciente al subarchipiélago Sabana Camagüey, colindando por el este con la (UEB) de atención al hombre perteneciente a la empresa constructora de obras para el turismo (ECOT); por el norte y oeste con bosque siempre verde micrófilo y por el sur con el bosque de mangle. (UEBCayoSantaMaría, 2014)

2.1 Estructura de consumo de portadores energéticos durante el año 2014.

A continuación se muestra una tabla con el consumo de diésel, fuel oil y aceite de la Central Eléctrica Cayo Santa María durante el año 2014 en litros (l) y Toneladas Equivalentes de Petróleo (TEP).

Tabla 13. Consumo de la Central Eléctrica de Cayo Santa María. (UEBCayoSantaMaría, 2014)

Portador Energético	MAN	HYUNDAI	MTU	Total Consumido.	% del total del TEP.	%Acum .
Fuel Oil (l)	12970975	2552010	-----	15522985	88.6	88.6
Fuel Oil (TEP)	13052.6	2568.1	-----	15620.6		
Diésel (l)	363007	-----	140688	1769890	10.9	99.5
Diésel (TEP)	393.8	-----	1526.3	1920.1		
Aceite (l)	85143		7442	92585	0.5	100
Aceite (TEP)	84.9		7.4	92.3		
Total (TEP)				17633	100	-----

Como se puede apreciar el consumo de fuel oil es muy superior al de diésel, ya que el último solo se emplea en el arranque y parada de los motores Hyundai y MAN. Además, la carga de generación constante la llevan los Hyundai y MAN que son fuel oil, los motores MTU, que emplean combustible diésel solo se utilizan cuando es necesario apoyar algún pico de demanda y por lo general trabajan pocas horas al día. En la **figura 5** se muestra un gráfico de pastel, donde se representa la estructura de consumo de la central, notable es la supremacía del fuel oil sobre los demás portadores consumidos, representando el 89.3 % del total,

dejando en segundo puesto al Diésel con un 10.2 %. Luego le siguen la energía eléctrica consumida por la central en concepto de insumos (4.3 %) y por último el aceite utilizado en la lubricación de los motores de combustión interna y demás equipos.

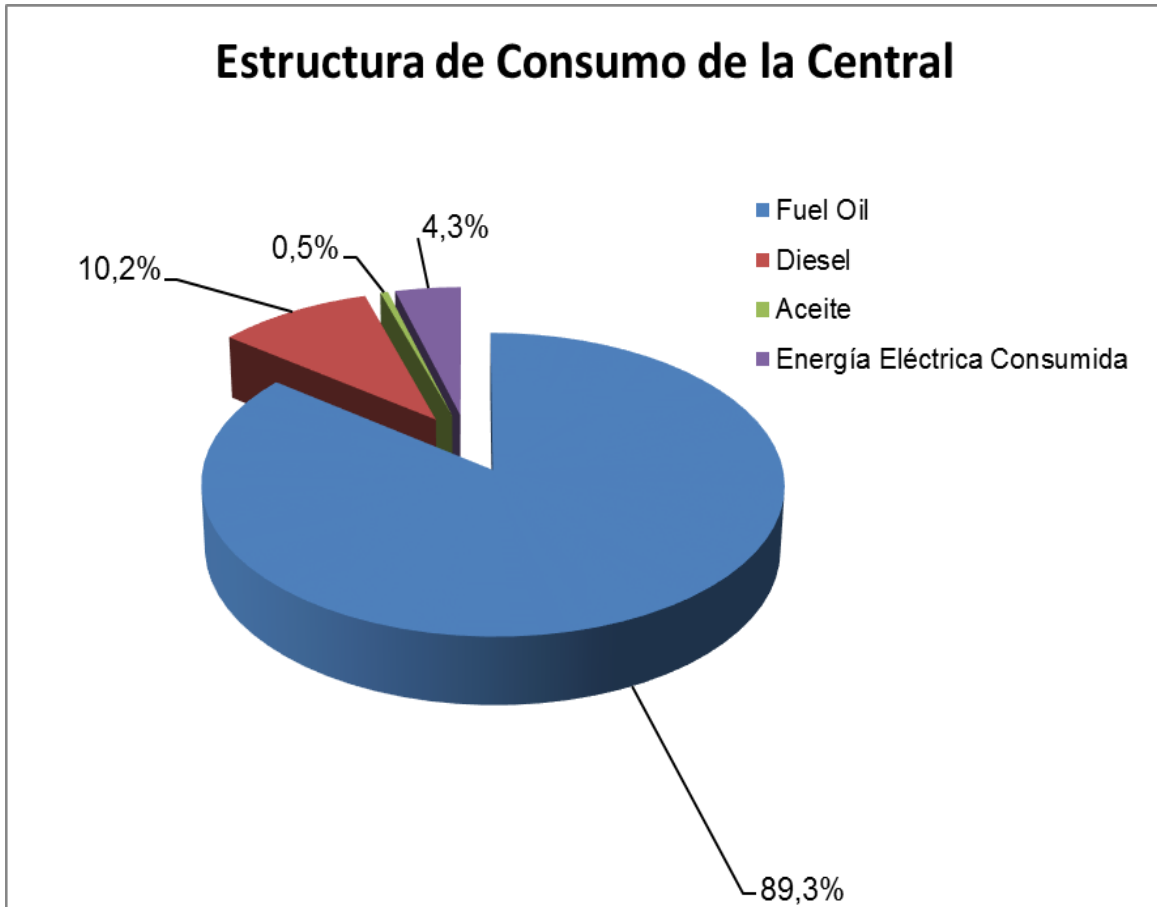


Figura 5. Gráfico de la estructura de consumo de la Central Eléctrica de Cayo Santa María durante el año 2014. (UEBCayoSantaMaría, 2014)

En la **tabla 14** se muestra la generación bruta, neta y el insumo de energía eléctrica de la central eléctrica Cayo Santa María en el año 2014, apreciándose la mayoría absoluta de generación e insumo del grupo Hyundai y MAN, representando el 93.1 % del total de generación y el 4.2 % de insumo de su generación bruta. Mientras que el grupo MTU representa el 6.9 % del total de generación y cuenta con un insumo del 5 % de su generación.

Tabla 14. Distribución de la generación de energía eléctrica durante el año 2014.(UEBCayoSantaMaría, 2014)

Motores	Generación Bruta (kWh)	Generación Neta (kWh)	Insumo (kWh)	% del total de generación.	% de insumo.
MAN & HYUNDAI	$6.7 \cdot 10^7$	$6.4 \cdot 10^7$	$2.8 \cdot 10^6$	93.1	4.2
MTU	$5.2 \cdot 10^6$	$4.9 \cdot 10^6$	$2.6 \cdot 10^5$	6.9	5
Totales	$7.2 \cdot 10^7$	$6.9 \cdot 10^7$	$3.1 \cdot 10^6$	-----	4.3

En la **figura 6** se muestra un gráfico de consumo de Fuel Oil contra generación de energía eléctrica, en el cual se aprecia una buena relación entre ambos parámetros, además de cambios en diferentes meses del año. En los meses de febrero, marzo y abril se observa un aumento de la generación y el consumo dado por el incremento del turismo, llamada temporada alta del turismo extranjero. Luego existe un descenso a partir de abril, y en junio comienza nuevamente el aumento de la generación y el consumo de energía eléctrica por el incremento del turismo nacional dado el verano en nuestro país y el invierno en el extremo sur de nuestro continente, dígame Argentina, Chile, Uruguay, etc. Ya en septiembre disminuye nuevamente la demanda, aunque se eleva a partir de noviembre por la temporada alta del turismo europeo y canadiense principalmente.

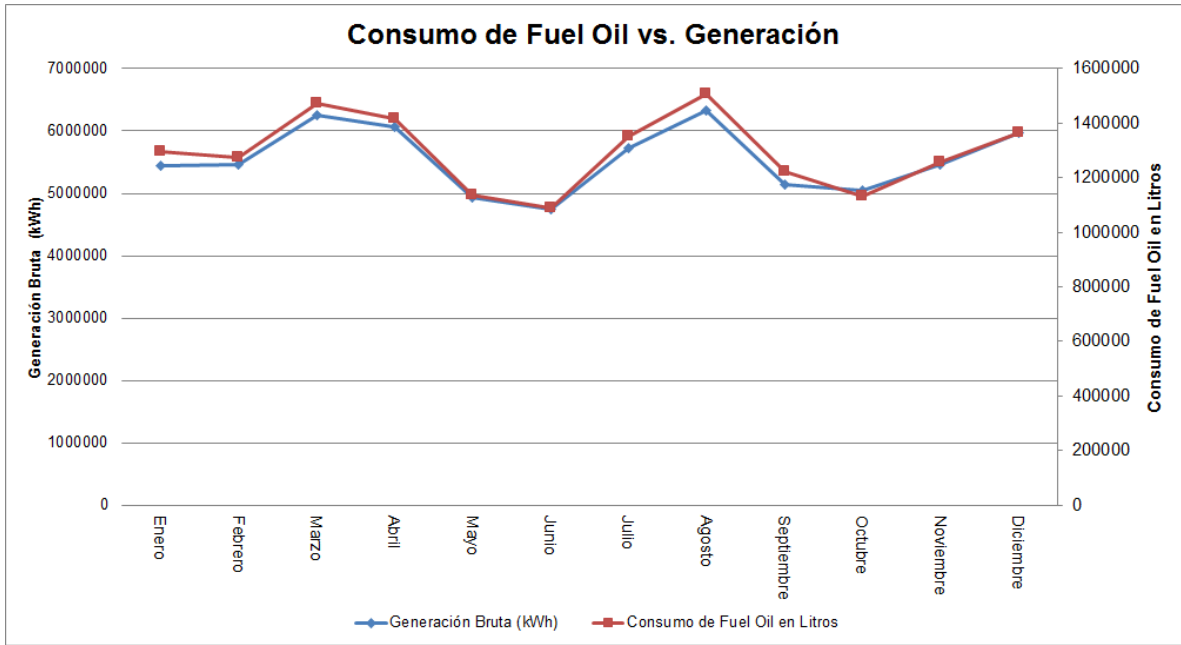


Figura 6. Gráfico de consumo de Fuel Oil contra generación de energía eléctrica en el año 2014. (UEBCayoSantaMaría, 2014)

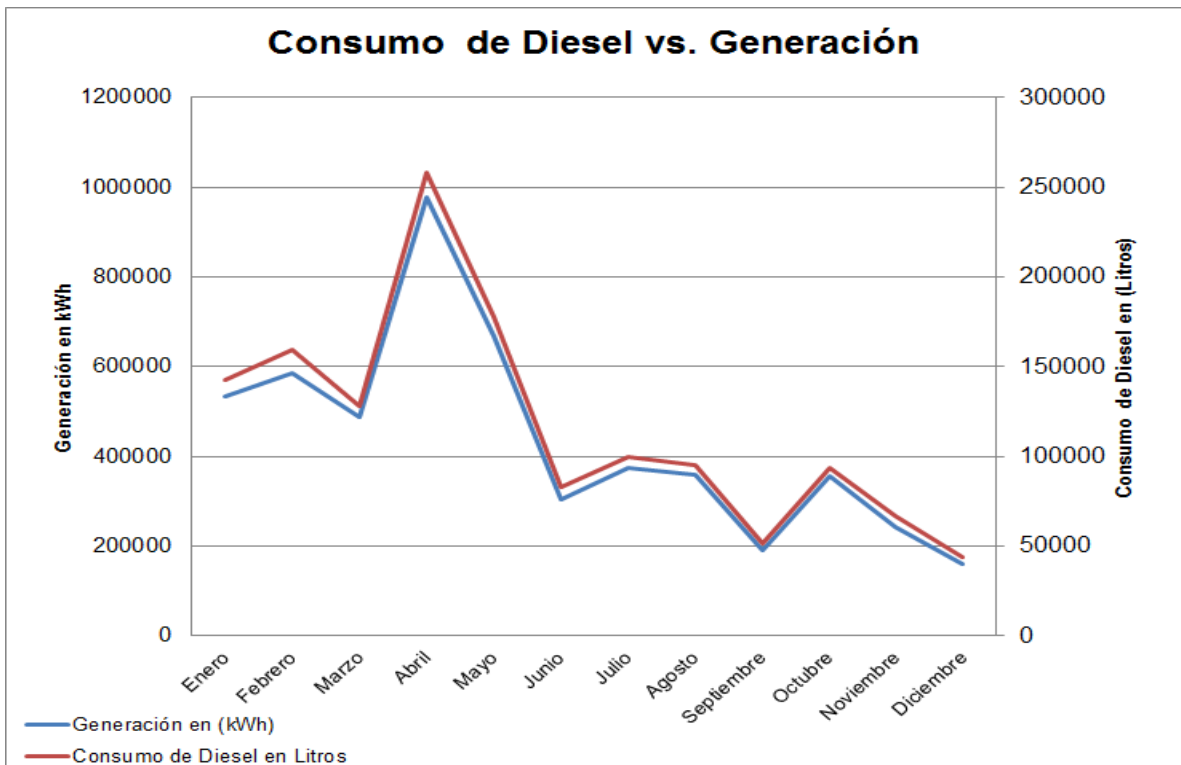


Figura 7. Gráfico de consumo de Diésel contra generación de energía eléctrica durante el año 2014. (UEBCayoSantaMaría, 2014)

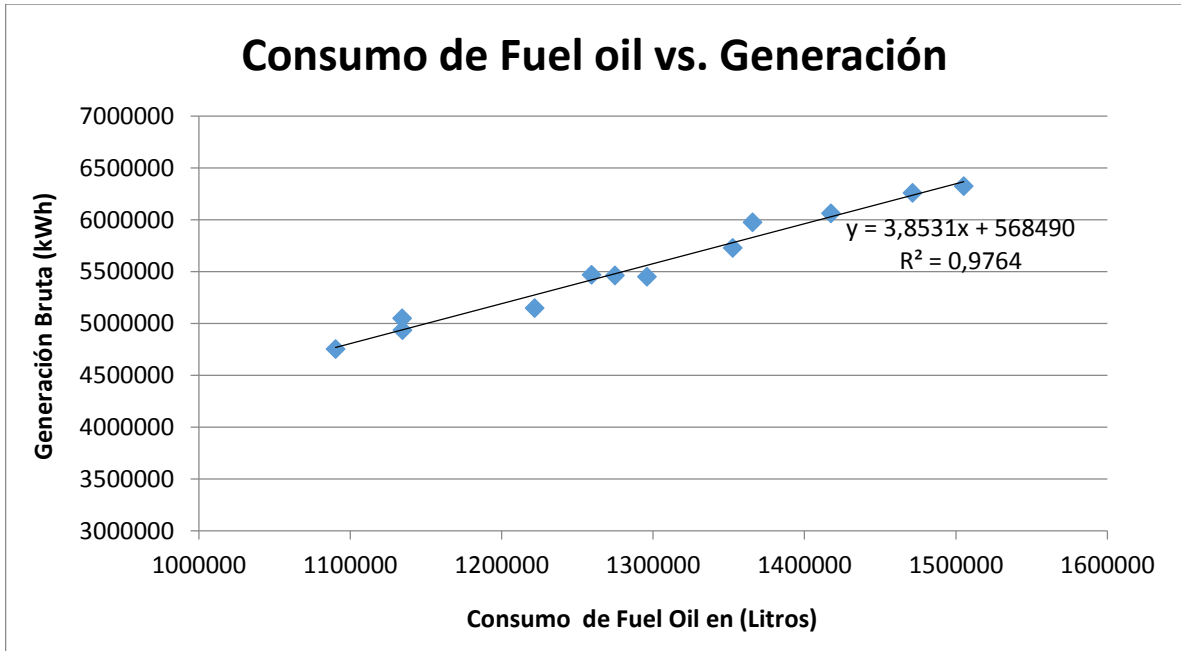


Figura 8. Grafico de dispersión que relaciona generacion de energia electrica y consumo de Fuel Oil en el año 2014. (UEBCayoSantaMaría, 2014)

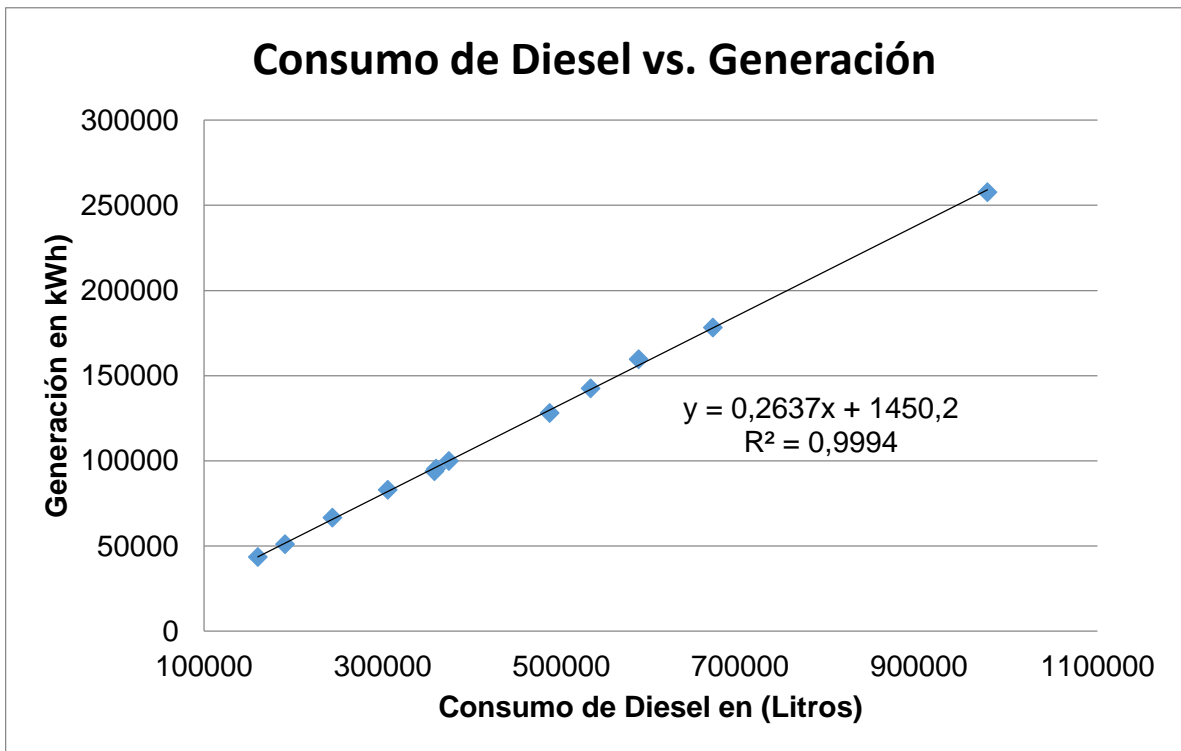


Figura 9. Gráfico de dispersión que relaciona consumo de Diésel contra generación de energía eléctrica. (UEBCayoSantaMaría, 2014)

En las **figuras 8 y 9** se aprecia la excelente correlación entre consumo de diésel y fuel oil contra generación de energía eléctrica durante el año 2014.

2.2 Índices de eficiencia energética

El estudio de eficiencia energética de la UEB Cayo Santa María está basado principalmente en el consumo específico de los motores de generación de energía eléctrica, tanto de Fuel Oil como de Diésel. Este consumo específico está dado por la cantidad de combustible que se consume para generar un kilowatt/hora de energía eléctrica y se expresa en g/kWh. Luego de analizar este indicador comprobamos que este se encuentra por encima de lo establecido por la UNE (Unión Eléctrica Nacional). En el caso de los motores que consumen combustible diésel el parámetro establecido es de 220 g/kWh y el emplazamiento registra valores promedio de 229 g/kWh, lo cual muestra una clara falta de eficiencia. Para los motores que consumen fuel oil se registró un consumo específico promedio de 228.5 g/kWh, también por encima del valor recomendable para este tipo de motores, ya que la UNE estipula en su Plan de Operaciones de diciembre del 2014 un valor de 211.5 g/kWh. (UNEVillaClara, 2014)

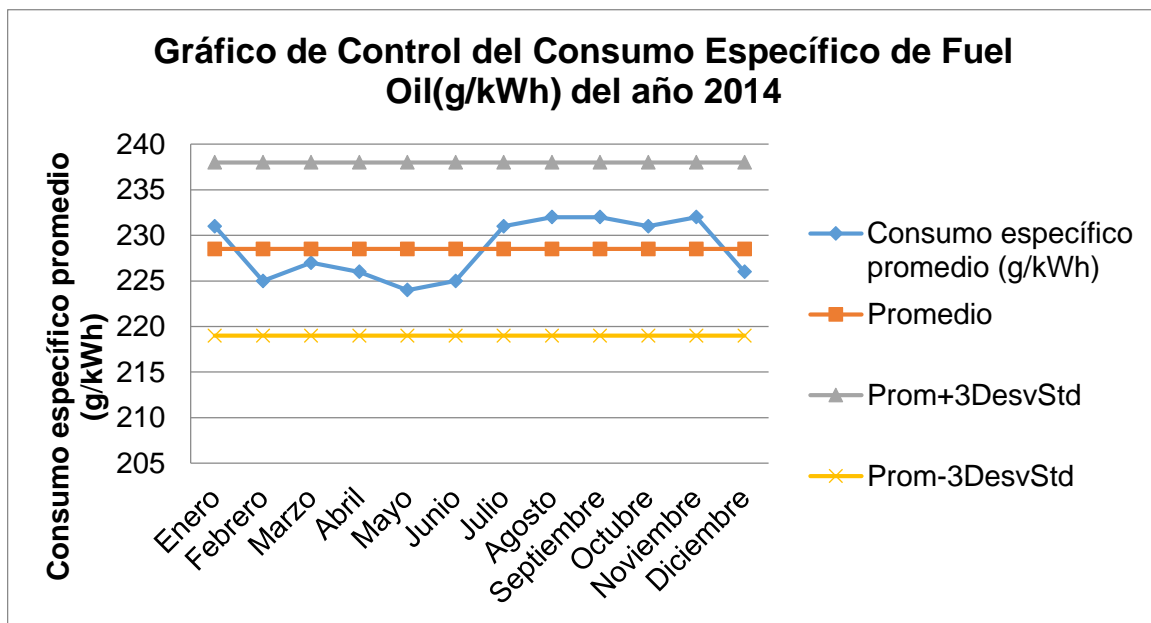


Figura 10. Gráfico de control del consumo específico de los motores Fuel Oil Hyundai y MAN durante el año 2014. (UEBCayoSantaMaría, 2014)

Se muestra en el **gráfico 10** como solo existen picos de ahorro en los meses de febrero, mayo, junio y diciembre, todo lo contrario ocurrió entre julio y noviembre, donde el consumo específico se elevó considerablemente, comprometiendo la eficiencia de la planta, lográndose un consumo específico mínimo de 224 g/kWh en mayo y valor máximo en noviembre de 232 g/kWh. La media de consumo alcanzó los 228 g/kWh.

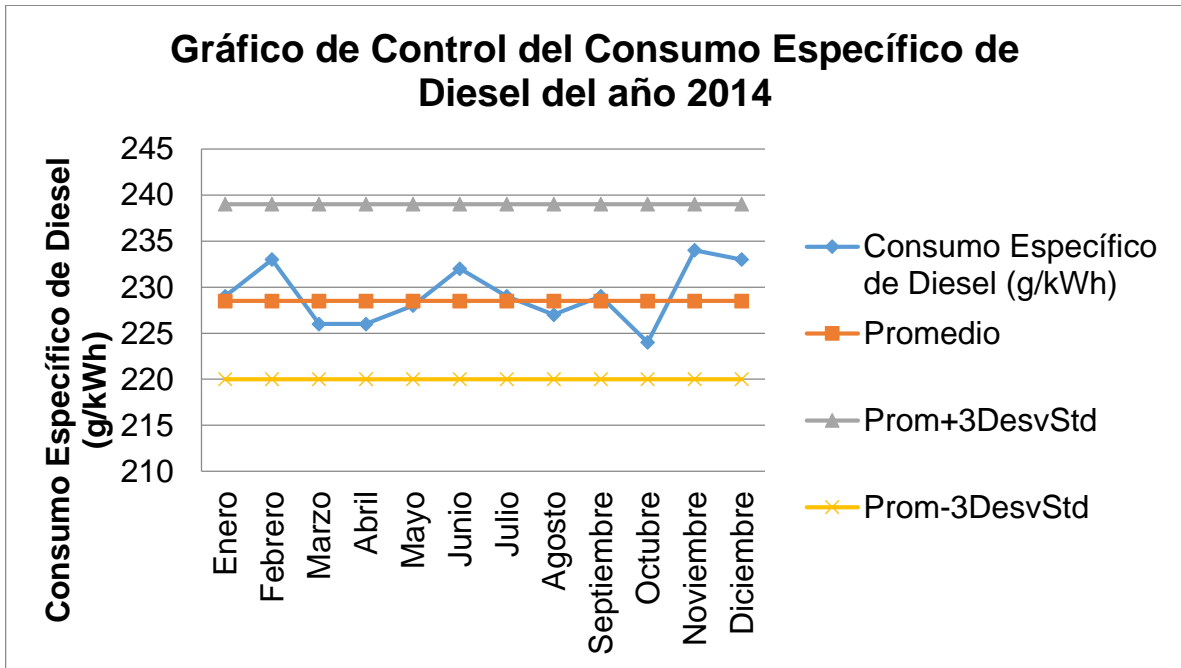


Figura 11. Gráfico de control del consumo específico de los motores Diésel MTU durante el año 2014. (UEBCayoSantaMaría, 2014)

En la **figura 11** anterior se plasma como varía el consumo específico de los motores diésel MTU, alcanzando valores mínimos en marzo, abril y octubre, no logrando mantener estos picos de ahorro durante todo el año 2014. En el mes de noviembre se elevó el consumo específico hasta los 234 g/kWh y el valor mínimo se registró en el mes de octubre con 224 g/kWh.

2.3 Principales consumidores

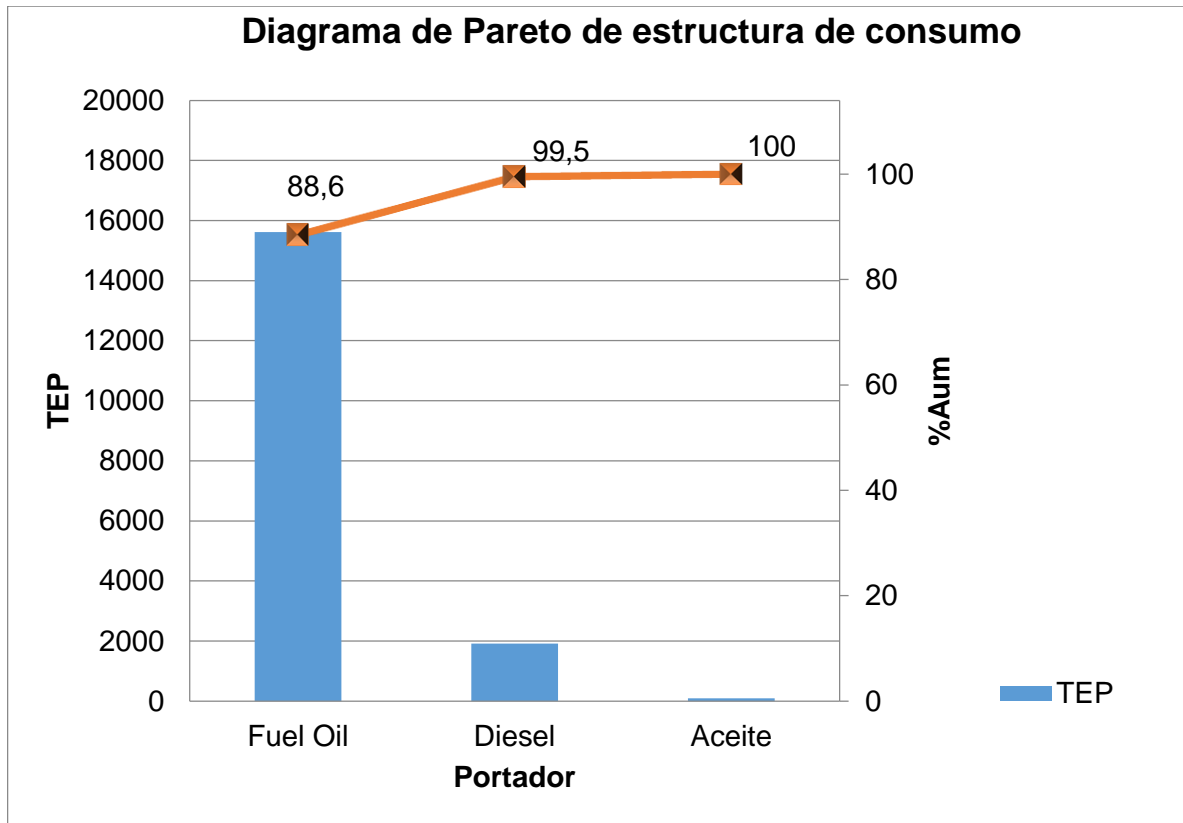


Figura 12. Diagrama de Pareto de la estructura de consumo de la Central Eléctrica Cayo Santa María durante el año 2014. (UEBCayoSantaMaría, 2014)

En la **figura 12** se muestra como el fuel oil es el principal portador energético consumido en el emplazamiento, con un valor de 15620 TEP, representando el 88.6 % del total de consumo. Luego le sigue el Diésel con 1920.1 TEP representando el 10.9 % y por último el aceite con 92.3 TEP y un 0.5 %.

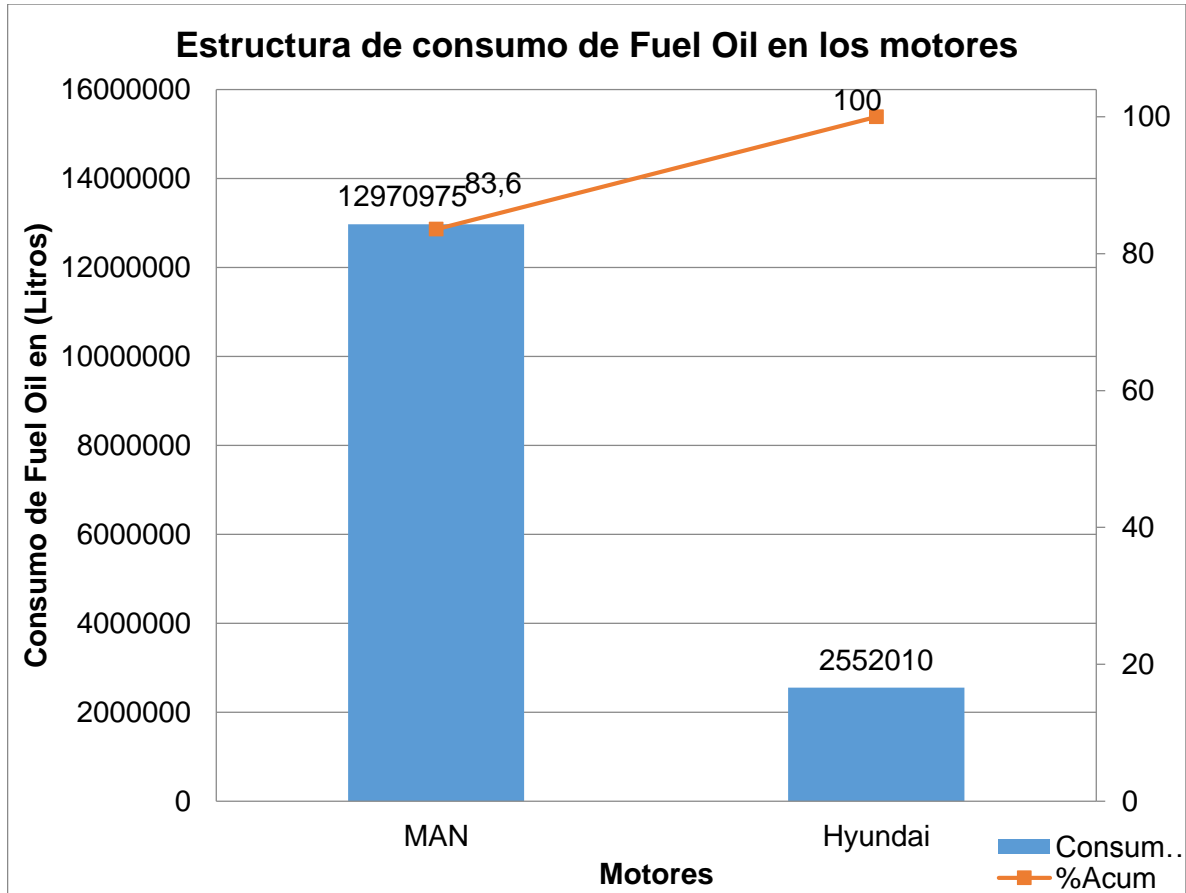


Figura 13. Gráfico de estructura de consumo de fuel oil en el año 2014 en la Central Eléctrica de Cayo Santa María. (UEBCayoSantaMaría, 2014)

En la **figura 13** es perfectamente apreciable la supremacía de los motores MAN sobre los Hyundai respecto al consumo de fuel oil, representando el 83.6 % del total de fuel oil consumido.

2.4 Determinación de los puestos claves.

Los puestos claves de consumo de fuel oil son:

- Motores de combustión interna Hyundai y MAN.
- Unidades de calentamiento de combustible.
- Planta de recepción y trasiego de combustible.

Se toma el fuel oil por ser quién decide sobre la eficiencia de la planta, ya que es el principal portador consumido.

Potenciales de ahorro energético de la central.

2.4.1 Oportunidades en ahorro en iluminación.

- Comprobar los niveles de iluminación existentes en el emplazamiento respecto a las normativas.
- Mantener en buen estado la pintura de las cajas de soporte de las lámparas.
- Usar en las calderas de vapor y el interior de los contenedores de motores lámparas de bajo consumo.
- Donde se pueda aprovechar la luz solar, usar celdas de control luminoso.
- Emplear temporizadores para el control de la iluminación en los contenedores (salas de mando).

2.4.2 Oportunidades de ahorro en los motores eléctricos.

- Medir el aislamiento en los motores eléctricos periódicamente.
- Verificar las conexiones de los motores sistemáticamente.
- Chequear las conexiones a tierra para evitar fugas y accidentes.
- Evitar el trabajo en vacío prolongado de los motores.
- Comprobar los rodamientos y la alineación del motor eléctrico.

2.4.3 Oportunidades de ahorro en los sistemas de Aire Acondicionado.

- Eliminar el calor infiltrado a través de aberturas de puertas y ventanas con una correcta disciplina tecnológica.
- Limpiar los filtros de aire regularmente una vez por semana.
- Verificar el estado de las instalaciones eléctricas.
- Mantener la temperatura del termostato en 25° C en verano y 18 ° C en invierno.
- Apagar los equipos en habitaciones vacías.
- Cubrir cristales de ventanas expuestos al sol con películas controladoras de la transmisión de calor.
- Estudio bioclimático de locales para determinar espacios de mayor incidencia solar.
- Comprobar la selección de los equipos de acondicionamiento de aire en

función de la carga necesaria.

2.5 Conclusiones parciales.

- El fuel oil es el combustible más utilizado en la generación de energía eléctrica en el emplazamiento, representando el 88.6 % del total de consumo.
- Los motores Hyundai y MAN generaron 67 millones de kWh brutos, con un porcentaje de insumo del 4.2 %, por su parte los motores MTU alcanzaron los 5.2 millones de kWh y un insumo del 5%. El insumo está dentro de los valores establecidos para estas instalaciones, que es de 3 a 5 %.
- Los motores Hyundai y MAN generaron el 93.1 % del total de energía, mientras que los MTU solo un 6.9 %.
- Los parámetros de consumo específico de combustible son de 229 g/kWh para los motores que consumen combustible diésel y 228.5 para los motores que consumen combustible fuel oil.
- El consumo específico está por encima de los parámetros establecidos por la UNE, 220 g/kWh para motores que consumen diésel y 211.5 g/kWh los motores que consumen Fuel Oil.
- Los puestos claves de consumo de fuel oil son: los motores Hyundai y MAN, las unidades de calentamiento de combustible y la planta de recepción y trasiego de combustible.
- No se logró obtener datos del consumo interno del emplazamiento por áreas de servicio ya que esta información no se controla en la entidad.

CAPÍTULO 3. Cálculo del ciclo de trabajo del Motor de Combustión Interna (MCI).

En este capítulo se realizará el cálculo del ciclo de trabajo del Motor de Combustión Interna mediante el software MATLAB. Se calculará el ciclo de un motor a gas y de un motor diésel con turbocompresor, dando continuidad a un estudio realizado el curso anterior, donde se logró desarrollar el cálculo para motores diésel (encendido por compresión) y de gasolina (encendido por chispa). Para lograr una mejor comprensión de la tarea a realizar a continuación se mostrarán una serie de pasos a seguir para realizar el cálculo.

3.1 Parámetros Iniciales.

3.1.1 Combustible líquido.

El cálculo es en base a 1kg de combustible.

El cálculo de la cantidad de aire teórico necesaria para la combustión (l_0) se halla mediante la ecuación (1):

$$l_0 = \frac{1}{0.23} \left(\frac{8}{3} C + 8H - O_c \right) \quad (\text{kg}) \quad (1).$$

Tenemos:

L_0 : Cantidad de aire teórico.

C: Carbono

H: Hidrógeno

O_c : Oxígeno

$$L_0 = \frac{1}{0.209} \left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} - \frac{O_c}{32} \right) \quad (\text{kmol}) \quad (2).$$

$$l_0 = \mu_a * L_0 \quad (3).$$

Tenemos:

L_0 – Cantidad teórica de aire necesaria

μ_a – Masa molecular aparente del aire

Este resultado se comprueba mediante la ecuación:

$$L_0 = \frac{l_0}{\mu_a} \quad (4).$$

Cantidad real de aire que participa en la combustión de 1 kg de combustible para

$$\alpha = \frac{1}{l_0}, \text{ se tiene la ecuación 5.}$$

$$\alpha * l_0 \text{ (kg)} \quad (5).$$

Donde:

α - Coeficiente de exceso de aire.

Se tiene la ecuación 6.

$$\alpha = \frac{L}{L_0} \text{ Despejando nos queda } \alpha L_0 \text{ (kmol)} \quad (6).$$

La cantidad total de mezcla fresca, de acuerdo a la expresión 7. Que dice que para cualquier combustible la masa de la mezcla en (kg) es:

$$G_1 = 1 + \alpha l_0 \text{ (kg)} \quad (7).$$

Donde:

G_1 : Es la cantidad total de mezcla fresca.

La mezcla carburante y la composición de los productos de combustión para $\alpha > 1$ (combustión completa). En el motor de encendido por chispa el aire y el combustible, forman una mezcla carburante (en kmol), constituida por vapores de combustible y aire, en caso de combustión completa de 1kg de carburante es:

$$M_1 = \frac{1}{\mu_c} + \alpha L_0 \text{ (kmol)} \quad (8).$$

Donde:

M_1 : Cantidad total de aire

μ_c : Masa molecular del combustible

La cantidad de cada uno de los componentes de los productos de combustión y su suma, asumiendo que $K = 0.5$, de acuerdo a las expresiones (9...13), son:

Donde:

$$M_{CO} = 0.42 \frac{1-\alpha}{1+K} L_0$$

$$M_{CO_2} = \frac{C}{12} - M_{CO}$$

$$M_{H_2} = KM_{CO} = kmol \quad (9.10.11.12.13)$$

$$M_{H_2O} = \frac{H}{2} - M_{H_2}$$

$$M_{N_2} = 0.79\alpha L_0$$

La cantidad total de los productos de combustión son:

$$M_2 = M_{CO} + M_{CO_2} + M_{H_2} + M_{H_2O} + M_{N_2} \quad (\text{kmol})$$

El incremento de volumen es:

$$\Delta M = M_2 - M_1 = kmol \quad (14).$$

Donde:

ΔM : Es el incremento de volumen.

El cambio de volumen durante la combustión se suele expresar por una magnitud relativa, el coeficiente teórico de variación molecular se determina mediante la ecuación 15.

Donde:

M_2 : Cantidad total de los productos de combustión.

M_1 : Cantidad total de aire.

μ_0 - Coeficiente teórico de variación molecular.

Se determina:

$$\mu_0 = \frac{M_2}{M_1} = kmol \quad (15).$$

3.1.2 Combustible gaseoso.

El cálculo para los motores de combustible gaseoso se hace en base a un m³ de gas.

La cantidad teórica de aire en (mol o m³) de combustible gaseoso, compuesto por una serie de elementos de tipo C_nH_mO_r se determina por:

$$L_o = \frac{1}{0.21} \sum \left(n + \frac{m}{4} - \frac{r}{2} \right) \times C_n H_m O_r \quad (\text{m}^3) \quad (16).$$

Donde:

C_nH_mO_r: Es la fracción volumétrica de cada componente en la mezcla.

L_o: Cantidad teórica de aire necesaria.

La cantidad total de mezcla fresca que ingresa el cilindro en m³ se determina por la expresión:

$$M_1 = 1 + \alpha \times L_o \quad (\text{m}^3) \quad (17).$$

Donde α (alpha) representa la relación entre la cantidad de aire real que ingresa al cilindro y la cantidad necesaria para la combustión teórica. De esta forma se considera α=1 cuando se igualan la cantidad de aire real y teórica para la combustión. El coeficiente α puede tomar valores menores que la unidad cuando se forman las llamadas mezclas ricas con las cuales se alcanzan las mayores velocidades de frente de llama. (α =0.85... 0.9) Puede tomar también valores mayores que la unidad (α =1.1... 1.3) para formar las mezclas pobres que garantizan en funcionamiento económico del motor. (Jóvaj, 1987)

El cálculo del ciclo de trabajo se realiza para las condiciones de máxima potencia, por lo que se toman los valores en el rango. (α =0.85... 0.9) No obstante, al emplear un combustible gaseoso, donde se puede alcanzar un mejor mezclado es posible trabajar con la mezcla estequiométrica considerando que se realice la combustión completa. Para el caso del cálculo del ciclo empleando como combustible biogás se puede tomar α =1. (Jóvaj, 1987)

Cálculo de la cantidad de productos de la combustión.

Si se quema 1 mol o m^3 de combustible gaseoso, los productos individuales pueden determinarse a partir de las siguientes expresiones:

$$M_{CO_2} = \sum n \times (C_n H_m O_r) \quad (m^3) \quad (18).$$

$$M_{H_2O} = \sum \frac{m}{2} \times (C_n H_m O_r) \quad (m^3) \quad (19).$$

$$M_{O_2} = 0.21 \times (\alpha - 1) \times L_o \quad (m^3) \quad (20).$$

$$M_{N_2} = 0.79 \times \alpha \times L_o + N_2 \quad (m^3) \quad (21).$$

En los productos totales hay que considerar el nitrógeno presente en el aire:

$$M_{N_2} = 0.79 \times \alpha \times L_o \quad (m^3) \quad (22).$$

Los productos totales se determinan por la suma de cada uno de los productos individuales según la ecuación:

$$M_2 = M_{CO_2} + M_{H_2O} + M_{O_2} + M_{H_2} + M_{N_2} \quad (m^3) \quad (23).$$

Cálculo del incremento de volumen de los productos de la combustión:

$$\Delta M = M_2 - M_1 \quad (m^3) \quad (24).$$

ΔM : Incremento de volumen.

Coeficiente teórico de variación molecular como índice del cambio de volumen durante la combustión:

$$\mu_0 = \frac{M_2}{M_1} \quad (25).$$

Donde:

M_2 - Cantidad total de los productos de combustión

M_1 - Cantidad total de aire

μ_0 - Coeficiente teórico de variación molecular

3.2 Parámetros del proceso de admisión.

La densidad de la carga en la admisión $\rho_k = p_0 / (RT_0)$, para el aire $R_a = 8314 / \mu_a$

Adoptando que $w_k = 0$, las alturas de nivel $Z_k = Z_a$, y despreciando la variación de la densidad de la carga fresca durante su movimiento en el sistema de admisión ($\rho_k = \rho_a$), obtendremos:

$$\frac{p_k}{\rho_k} = \frac{p_a}{\rho_a} = (\beta^2 + \xi) \frac{w^2_{ad}}{2} \quad (26).$$

$$\Delta p_a = p_k - p_a = (\beta^2 + \xi_{ad}) \frac{w^2_{ad}}{2} * \rho_k \quad (27).$$

Donde:

ξ_{ad} – Coeficiente de resistencia del sistema de admisión.

p_k – Presión del aire de carga.

p_a – Presión al inicio de la admisión.

β – Coeficiente de amortiguación de la velocidad de la carga.

w^2_{ad} - La velocidad de la carga en la sección de la válvula de admisión.

Para el caso del motor de cuatro tiempo si sobre alimentación $p_k = p_0$ y $\rho_k = \rho_0$.

La presión al final de la admisión, siendo $\underline{p_k = p_0}$, de acuerdo a la expresión 28 resulta:

$$p_a = p_0 - (\beta^2 + \xi) \frac{w^2_{ad}}{2} \rho \times 10^{-6} = MPa \quad (28)$$

Donde:

p_a – Presión al final de la admisión.

β – Coeficiente de amortiguación de la velocidad de la carga.

ξ_{ad} – Coeficiente de resistencia del sistema de admisión.

w_{ad} - La velocidad de la carga en la sección de la válvula de admisión [m/s]

Motor sobrealimentado:

Para el caso del motor sobrealimentado, se tiene la ecuación 29 para el cálculo de

p_a :

$$p_a = (0.9...0.96) * p_k = MPa \quad (29).$$

El cálculo de la temperatura en la admisión se realiza según la ecuación 30:

$$T_a = \frac{T_k + \Delta T + \varphi * \gamma_r * T_r}{1 + \gamma_r} \quad (30).$$

Donde:

γ_r - Coeficiente de gases residuales

T_k - Temperatura del aire de carga dada por el turbocompresor.

ΔT - Diferencial de temperatura en el intercambiador.

T_r - Temperatura de los gases residuales.

φ - 1

Motor sin sobrealimentación:

El coeficiente de gases residuales, para $T_k = T_0$, se halla de la ecuación (31).

$$\gamma_r = \frac{T_0 + \Delta T}{T_r} \times \frac{P_r}{\varepsilon p_a - p_r} \quad (31).$$

Para el motor sin sobrealimentación la temperatura de admisión se halla por la ecuación 32:

$$T_a = \frac{T_0 + \Delta T + \gamma_r T_r}{1 + \gamma_r} = K \quad (32).$$

T_0 - Temperatura de aire de carga.

El rendimiento Volumétrico, de acuerdo a la expresión 33, siendo $T_k = T_0$, $p_k = p_0$

y asumiendo que $\varphi = \varphi_l = \varphi_s = 1$, es

$$\eta_v = \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \times \frac{p_a}{p_0} \times \frac{T_0}{T_a(1 + \gamma_r)} \quad (33).$$

Donde:

η_v - Rendimiento volumétrico

Además la ecuación 34 para motores de cuatro tiempos arroja:

$$\eta_v = \frac{T_0}{T_0 + \Delta T_0} \times \frac{1}{\varepsilon - 1} \left(\varepsilon \frac{P_a}{P_0} - \frac{P_r}{P_0} \right) \quad (34).$$

Cuando el motor se alimenta con gas se puede asumir introduciendo un error muy pequeño que la carga que ingresa al cilindro está formada solamente por aire.

3.3 Parámetros del proceso de compresión.

Adaptamos el exponente politrópico de compresión n_1 .

La presión al final de la compresión, según la ecuación 35, es:

$$p_c = p_a \varepsilon^{n_1} = MPa \quad (35).$$

La temperatura al final de la compresión se halla de 36:

$$T_c = T_a \varepsilon^{n_1 - 1} = K \quad (36).$$

3.4 Parámetros al final del proceso de combustión.

En caso de motores de encendido por chispa se supone que la combustión se efectúa instantáneamente a volumen constante de la cámara de combustión V_c , es decir, la curva real de la elevación de presión en el diagrama indicado durante el proceso de combustión es reemplazada por la isocora cz (**figura 14**). Al hacer esto los gases no efectúan trabajo exterior en el período de la combustión y todo el calor desprendido se consume solamente en incrementar su energía interna. (Araque, 2005)

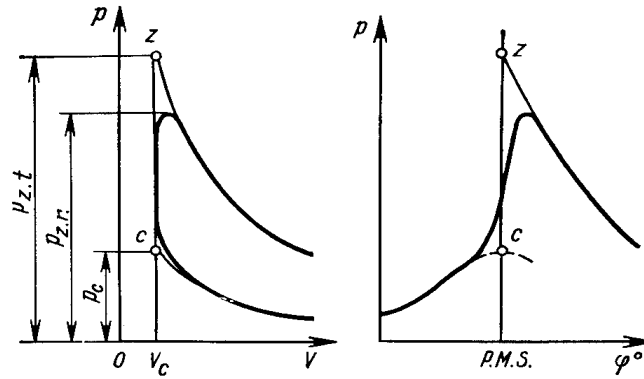


Figura 14. Líneas de combustión en los diagramas indicados de un motor de encendido por chispa. (Benítez, 1994)

Para los motores Diésel, en los cuales la combustión al principio se desarrolla rápidamente, pero luego decelera velozmente, la curva compleja de variación de la presión en el diagrama indicado durante el período de combustión, se sustituye por dos rectas: la isocora cz' y la isobárica $z'z$ (**figura 15**), es decir, se analiza el ciclo con suministro mixto de calor. Aquí durante el período de la combustión visible (tramo $z'z$) se efectúa el trabajo $l_{cz} = p_z (V_z - V_c)$. (Araque, 2005)

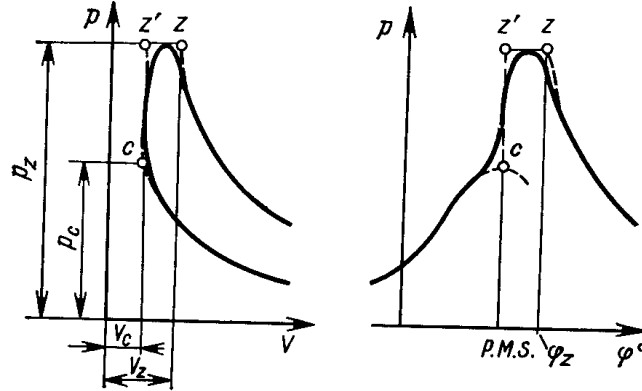


Figura 15. Líneas de combustión en los diagramas indicados de un motor Diésel: Líneas llenas — proceso real; líneas de trazos — ciclo con suministro mixto de calor. (Benítez, 1994)

En cualquier caso (siendo la combustión a $V = \text{constante}$ o en el ciclo mixto) las pérdidas totales de calor, debidas a la combustión incompleta e inoportuna, así como a la disociación y a la emisión de calor a las paredes son consideradas por el coeficiente de aprovechamiento del calor de combustión ξ_z , determinado experimentalmente. (Araque, 2005)

El cálculo se realiza para un 1 kg de combustible.

Para el caso del ciclo con suministro mixto de calor el resultado es:

$$\frac{\xi_z H_u}{M_1(1+\gamma_r)} + \frac{U_c + \gamma_r U_c''}{1+\gamma_r} + 8314\lambda T_c = \mu_r (U_z'' + 8314T_z) = \text{kJ/kmol} \quad (37).$$

Donde:

ξ_z — Coeficiente de aprovechamiento del calor de combustión;

H_u — Bajo valor calórico del combustible;

γ_r — Coeficiente de gases residuales;

U_c — Energía interna de la mezcla fresca en el punto c;

U_c — Energía interna de los productos de la combustión en el punto c;

λ — Coeficiente de elevación de la presión;

T_c — Temperatura en el punto c;

μ_r — Coeficiente real de variación molecular;

U_z — Energía interna de los gases en z; y

T_z — Temperatura de los gases en z...

En caso de motores a gasolina y a gas, para los cuales se supone que la combustión se realiza a $V = \text{constante}$, y, consiguientemente, $l_{zz} = 0$, la ecuación adquiere una forma más simple:

$$\frac{\xi_z H_u}{(1+\gamma_r) M_1} + \frac{U_c + \gamma_r U_c''}{1+\gamma_r} = \mu_r U_z'' \quad \text{kJ kmol} \quad (38).$$

Siendo $\alpha < 1$ (el motor funciona con una mezcla enriquecida), parte del calor al quemar el combustible no se utiliza debido a que por falta de oxígeno la combustión será incompleta. Para este caso, en lugar de H_u en la ecuación es necesario poner $H_u - (\Delta H_u)_{\text{quím}}$, después de lo cual la ecuación de combustión a $V = \text{const.}$ adquiere la siguiente forma:

$$\frac{\xi_z [H_u - (\Delta H_u)_{\text{quím}}]}{(1+\gamma_r) M_1} + \frac{U_c + \gamma_r U_c''}{1+\gamma_r} = \mu_r U_z'', \quad (39).$$

A partir de estas ecuaciones se calcula T_z

En el ciclo con suministro mixto de calor, para calcular T_z es necesario fijar el grado de elevación de la presión $\lambda = p_z/p_c$, partiendo del valor máximo tolerable de p_z .

La ecuación característica de los gases ideales da la posibilidad de expresar la relación entre los parámetros del fluido operante al principio y al final de la combustión tomando en consideración la variación del número de moles:

$$\frac{p_z V_z}{p_c V_c} = \frac{M_2 + M_r}{M_1 + M_r} \frac{T_z}{T_c} \quad (40)$$

Donde:

M_1 — moles de la mezcla fresca;

M_2 — moles de los productos de la combustión;

M_r — moles de gases residuales.

El coeficiente de aprovechamiento del calor ξ_z se fija basándose en los resultados experimentales en correspondencia con el tipo de motor, su rapidez, condiciones de refrigeración y particularidades estructurales de las cámaras de combustión. Este coeficiente depende de los regímenes de carga y velocidad del motor. Los valores bajos de ξ_z indican no solo una fuerte emisión de calor a las paredes, sino también un considerable tiempo que abarca la extinción de la combustión en el proceso de expansión. A continuación vienen expuestos los límites de variación del coeficiente ξ_z cuando los motores funcionan a plena carga:

Motores de carburador	0,85—0,90
Motores Diésel	0,70—0,85
Motores a gas	0,80—0,85

Los valores reales de las presiones máximas en los cilindros de los motores a gasolina y a gas son necesarios para poder realizar los cálculos dinámicos y de resistencia mecánica y se determinan multiplicando los valores calculados de $p_{z \text{ cal}}$ obtenidos por un coeficiente empírico de disminución de la presión p_z , que toma en consideración el aumento del volumen de la cámara de combustión en el instante en que se alcanza la máxima presión, es decir,

$$p_{z r} = \varphi_z p_z \quad (41)$$

En coeficiente φ_z generalmente se adopta igual a 0,85. La presión máxima en el ciclo con suministro mixto de calor queda definida por la magnitud del grado de elevación de la presión λ , que generalmente se encuentra entre los límites de 1,4—2,2. Los mayores valores de λ son propios para los motores con cámaras de combustión no separadas; los valores menores corresponden a los motores con cámaras separadas.

3.5 Parámetros del proceso de expansión.

En el proceso de expansión (carrera de trabajo), se produce el trabajo mecánico a cuenta de la energía térmica que se desprende durante la combustión del carburante. En el ciclo real la carrera de trabajo empieza durante la combustión (punto c' , **figura 15**) y termina cuando comienza el proceso de escape de los gases quemados. Al calcular el ciclo se admite que el proceso de expansión comienza en el punto z siendo máximos los valores calculados de p_z y T_z (en el motor de encendido por chispa $V_z = V_c$, en el Diésel $V_z = \rho V_{z'}$). Se considera que en el ciclo de cuatro tiempos el proceso termina en el P.M.I. (punto b , si no se tiene en cuenta la previa apertura de la válvula de escape).

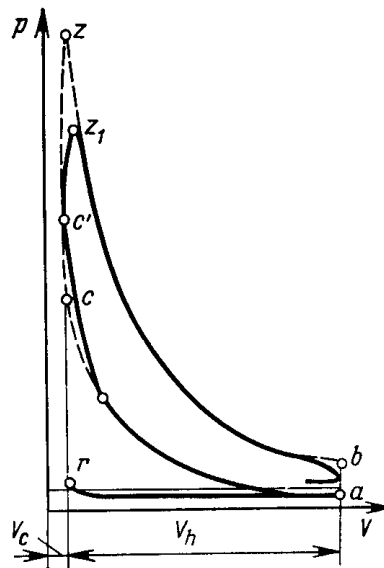


Figura 15. Proceso de expansión de un motor de encendido por chispa. (Navarro, 1998)

Al principio del proceso de expansión continúa la intensa combustión del carburante. La temperatura del gas, calculada a partir del diagrama indicado, alcanza su mayor valor en el proceso de expansión a la derecha del punto $p_{m\acute{a}x}$. Esto indica que en dicho período (en el tramo estudiado del diagrama hasta el punto $T_{m\acute{a}x}$) se desprende calor intensamente. (Navarro, 1998)

Simultáneamente, a consecuencia de la gran diferencia de temperaturas $T - T_{m,p}$ ($T_{m,p}$ es la temperatura media de la superficie que limita el volumen de trabajo del cilindro), así como de la gran velocidad de movimiento de los gases, se transmite intensamente calor desde el gas a las paredes de la culata, cilindro y cara del pistón.

En vista de las dificultades que aparecen al determinar los valores variables del exponente n_2 , que sirvan para calcular los parámetros al final del proceso de expansión, se utilizan valores promedios.

Para el proceso politrópico, siendo el exponente medio n_2 en el motor Diésel, la presión y temperatura al final de la expansión en el punto b se determinan acorde con las fórmulas:

$$p_b = p_z \left(\frac{V_z}{V_b} \right)^{n_2} = p_z \frac{1}{\delta^{n_2}} ; \quad (\text{MPa}) \quad (42)$$

$$T_b = T_z \frac{1}{\delta^{n_2 - 1}} . \quad (\text{K}) \quad (43)$$

Para el caso de un motor de encendido por chispa $\delta = \varepsilon$, por lo tanto:

Los valores de los parámetros del proceso de expansión para los motores de cuatro y dos tiempos (para la carga nominal) se exponen a continuación:

Tabla 15. Parámetros del proceso de expansión para diferentes motores. (Jóvaj, 1987)

Motor	n_2	p_b , (MP _a)	T_b , (K)
Motor de carburación.	1.23 – 1.30	0.35 – 0.50	1200 – 1500
Motor Diésel.	1.18 – 1.28	0.20 – 0.40	1000 – 1200

3.6 Parámetros de escape.

En el motor de cuatro tiempos desde el instante de apertura de la válvula de escape en el punto 1 hasta cierto valor de la presión, igual al crítico p_{cr} , el escape de los gases quemados tiene lugar a velocidad crítica (600—700 m/s) y va acompañado de un ruido estridente. Durante este período, que acaba cerca del P.M.I., se expulsa del cilindro del motor el 60—70 % de los gases quemados, disminuyendo la presión en el mismo. Cuando el émbolo se desplaza hacia el P.M.S. los gases quemados siguen expulsándose, pero a una velocidad que constituye de 200 a 250 m/s. (Jóvaj, 1987)

El trabajo consumido para expulsar los gases quemados, así como también el grado de barrido del cilindro, dependen de las fases del proceso de escape. Del diagrama indicado mostrado en la (**figura 16**) se desprende que, siendo la apertura de la válvula (punto 1') excesivamente temprana, el trabajo de expansión perdido, determinado por el área $l'bb'$, resulta excesivamente grande y no se compensará por la disminución del trabajo absoluto gastado para la expulsión. (Jóvaj, 1987)

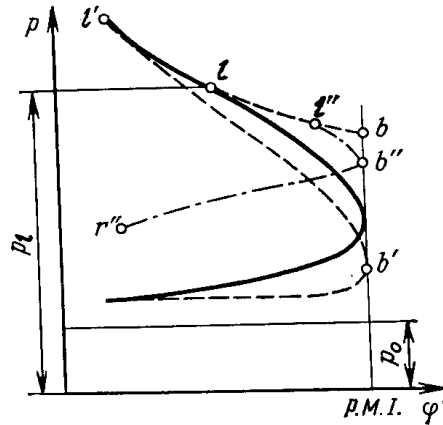


Figura 16. Tramo del diagrama indicado que caracteriza el proceso de escape en un motor de cuatro tiempos. (Morozov, 1983)

La apertura de la válvula de escape en el punto 1'' resulta retardada. Aunque en este caso las pérdidas del trabajo de expansión (área l''bb'') son menores, sin embargo, para empujar los gases quemados en el tramo b''r'' se consume un gran trabajo y el barrido de ellos del cilindro empeora. El instante de apertura de la válvula de escape (punto l) se elige experimentalmente.

En la **figura 16** se muestra con línea llena un tramo del diagrama indicado para las fases en las cuales se consiguen los mejores índices del motor.

La calidad de soplado del cilindro se puede elevar utilizando el movimiento ondulatorio de los gases en el tubo de escape o mediante el barrido del cilindro en el período de traslapo de válvulas (en los motores sobrealimentados).

El cambio de presión en el cilindro durante el escape depende de las condiciones que tenga el proceso de intercambio de gases. Cuando el motor funciona sin sobrealimentación el diagrama indicado tiene la forma que se muestra en la (**figura 17, a**), a. La línea que caracteriza el proceso de escape está situada por encima de la línea del proceso de admisión y el primer período del escape a velocidad crítica de salida del flujo termina cerca del P.M.I. Al haber sobrealimentación, en función de la relación p_k/p_p (p_p es la presión en el sistema de escape), son posibles los casos cuando el período del escape a velocidad crítica continúa cierto tiempo durante el movimiento del pistón hacia el P.M.S. y la

línea de admisión (**figura 17, b**) estará situada para la mayor parte de la carrera del pistón por encima de la línea de escape.

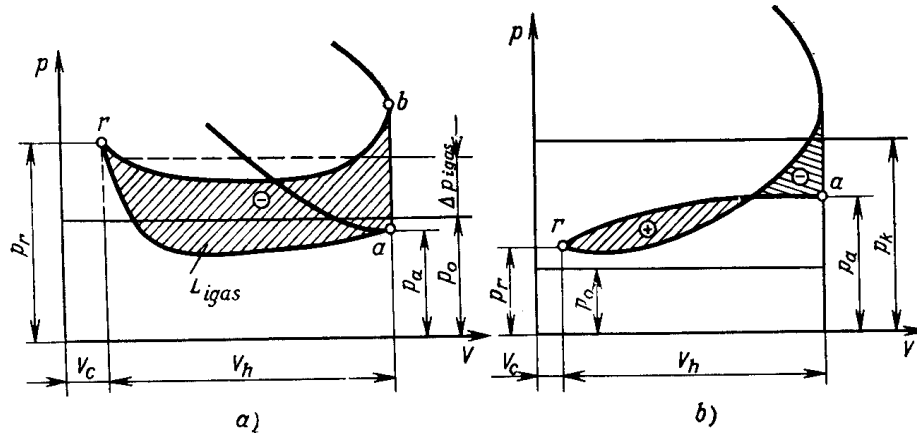


Figura 17. Desarrollo del proceso de escape en un motor de cuatro tiempos: a — cuando $p_r > p_a$, b — cuando $p_r < p_a$. (Morozov, 1983)

Al disminuir la carga del motor reduciendo la sección de paso de la mariposa, en el instante en que se abre la válvula de escape la presión será menor. Esto influye sobre el desarrollo del escape durante el primer período. Cuando el émbolo se desplaza hacia el P.M.S. la tendencia de cambio de la presión y su valor, bajo el cual transcurre el proceso de escape, prácticamente no varían.

La temperatura de los gases quemados depende de la carga y del régimen de velocidad del motor. Al elevar la frecuencia de rotación y la carga sube la temperatura de los gases quemados.

Para disminuir el ruido en los motores de automóviles, en el sistema de escape se monta un silenciador que crea resistencias adicionales en la salida. La estructura del silenciador y de todo el sistema de escape deberá elegirse de tal manera que durante la supresión del ruido las pérdidas hidráulicas sean mínimas. En ciertos casos la estructura del sistema de escape se elige tomando en consideración la obtención de una carga adicional en el cilindro al utilizar la sobrealimentación inercial. (O.Araque, 2005)

Asumimos que el exponente politrópico de expansión $n_2 = 1.24$. La presión al final de la expansión P_b se halla mediante la ecuación 46.

$$P_b = \frac{P_z}{\varepsilon^{n_2}} = MPa. \quad (46)$$

La temperatura al final de la expansión según la ecuación 47.

$$T_b = \frac{T_z}{\varepsilon^{n_2-1}} = K \quad (47)$$

3.7 Parámetros principales del ciclo.

La magnitud p_i se denomina presión media indicada del ciclo, que es la presión manométrica convencional de acción constante con la cual el trabajo realizado por los gases durante una carrera del pistón es igual al trabajo indicado correspondiente al ciclo.

1. Para el ciclo estudiado, obtendremos

$$P_{i \text{ nr}} = P_a \frac{\varepsilon^n}{\varepsilon-1} \left[\lambda (\rho-1) + \frac{\lambda \rho}{n_1-1} \left(1 - \frac{1}{\delta^{n_2-1}} \right) - \frac{1}{n_1-1} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon^{n_1-1}} \right) \right]. \quad (48)$$

2. Para el ciclo donde el calor se suministra solamente a volumen constante (motores de encendido por chispa), la presión media indicada para el diagrama no redondeado $aczb$ se determina a base de la ecuación (48) siendo $\rho = 1$. En este caso $\delta = \varepsilon$ y

$$P_{i \text{ nr}} = P_a \frac{\varepsilon^{n_1}}{\varepsilon-1} \left[\frac{\lambda}{n_2-1} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon^{n_2-1}} \right) - \frac{1}{n_1-1} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon^{n_1-1}} \right) \right] \quad (49)$$

3. Teniendo en cuenta que $1/\delta^{n_2-1} = T_b/T_z$; $1/\varepsilon^{n_2-1} = T_b/T_z$ y $1/\varepsilon^{n_1-1} = T_a/T_c$, las ecuaciones 48 y 49 obtendrán respectivamente la siguiente forma:

$$P_{i \text{ nr}} = P_a \frac{\varepsilon^{n_1}}{\varepsilon-1} \left[\lambda (\rho-1) + \frac{\lambda \rho}{n_2-1} \left(1 - \frac{T_b}{T_z} \right) - \frac{1}{n_1-1} \left(1 - \frac{T_a}{T_c} \right) \right] \quad (50)$$

$$P_{i\text{ nr}} = P_a \frac{e^{n_1}}{e-1} \left[\frac{\lambda}{n_2-1} \left(1 - \frac{T_b}{T_z} \right) - \frac{1}{n_1-1} \left(1 - \frac{T_a}{T_c} \right) \right]. \quad (51)$$

De los diagramas indicados del ciclo real del motor de carburador y Diésel se desprende que el trabajo indicado (correspondiente a dos carreras) del ciclo real redondeado es menor que el teórico en una magnitud equivalente a las áreas sombreadas en cruz. Su magnitud depende del carácter en que transcurre el proceso de combustión, así como del instante en que se inicia la apertura de la válvula de escape. La desviación de los valores reales de p_i con respecto a los calculados se evalúa a través del coeficiente de redondeo (plenitud) del diagrama φ_i .

La presión media indicada del ciclo real es:

$$p_i = \varphi_i p_{i\text{ nr}} \quad (52)$$

Según resultados experimentales, $\varphi_i = 0,92 \dots 0,97$. La desviación del ciclo real respecto al teórico en los motores de encendido por chispa es menor que en los motores Diésel. Por eso en los motores de encendido por chispa los valores de φ_i se aproximan al límite superior. Los motores Diésel con cámaras de combustión separadas (cámaras de turbulencia, antecámaras y otros) tienen coeficientes φ_i más próximos al límite inferior, debido a la existencia de pérdidas hidráulicas y térmicas adicionales. (Jóvaj, 1987)

Para el ciclo real de los motores de encendido por chispa, al hacer los cálculos, por lo común se adopta $p_z' = 0,85 p_{z\text{ cal}}$.

El consumo de la parte del trabajo indicado invertido en el intercambio de gases queda definido por el área L_1 gas. El trabajo del intercambio de gases también se acostumbra referirlo a la unidad del volumen de trabajo, expresándolo a través de cierta presión media Δp_{gas} .

Para el motor de cuatro tiempos sin sobrealimentación:

$$\Delta p_{\text{gas}} \approx \frac{L_{i \text{ gas}}}{V_h} = \varphi_{\text{gas}} (p_r - p_a). \quad (53)$$

La potencia correspondiente a las pérdidas mecánicas está constituida por las potencias que se gastan: en vencer la fricción N_{fr} ; en poner en accionamiento los mecanismos auxiliares (las bombas de agua y de aceite, el ventilador, el generador y otros) $N_{a.m}$; en el intercambio de gases) N_{gas} (se considera sólo en los motores de cuatro tiempos); en accionar el compresor o la bomba de barrido N_k .

Por consiguiente,

$$N_m = N_{fr} + N_{a.m} + N_{\text{gas}} + N_k \quad (54)$$

O respectivamente

$$p_m = p_{fr} + p_{a.m} + p_{\text{gas}} + p_k. \quad (55)$$

La presión media efectiva (en MPa) es igual a:

$$p_e = 30 \frac{N_e \tau}{i V_h n}. \quad (56)$$

Las pérdidas mecánicas se valoran por el rendimiento mecánico:

$$\eta_m = \frac{N_i - N_m}{N_i} = 1 - \frac{N_m}{N_i} = \frac{N_e}{N_i} \quad (57)$$

O bien

$$\eta_m = \frac{p_i - p_m}{p_i} = 1 - \frac{p_m}{p_i} = \frac{p_e}{p_i}. \quad (58)$$

El consumo específico indicado de combustible es:

$$g_i = \frac{\rho_k}{l_0} \cdot \frac{\eta_v}{\alpha p_i} \quad (59)$$

El gasto específico de combustible [en g/ (kWh)] será:

$$g_i = 3600 \frac{\rho_k \eta_v}{\alpha l_0 p_i}, \quad (60)$$

2. Si se expresa p_e en MPa y el consumo específico de combustible g_e en g/(kWh), la fórmula obtendrá la siguiente forma:

$$g_e = 3600 \frac{\rho_k \eta_v}{\alpha l_0 p_e} \cdot \quad (61)$$

El rendimiento indicado del ciclo obtendrá la siguiente fórmula:

$$\eta_i = \frac{3600}{g_{iH_u}} \quad (62)$$

3. El rendimiento efectivo del ciclo se determina mediante la expresión 63:

$$\eta_e = \eta_i \eta_m \cdot \quad (63)$$

10. El consumo horario de combustible constituye:

$$g_e N_e \times 10^{-3} = kg/h. \quad (64)$$

La cilindrada total del motor de encendido por chispa y el motor Diésel se halla mediante la ecuación 65:

$$iV_h = \frac{30N_e \tau}{p_e^n} L. \quad (65)$$

El volumen de trabajo de un cilindro es:

Designemos la relación S/D =J. Entonces:

$$V_h = \frac{\pi}{4} D^2 S = \frac{\pi}{4} D^3 J, \quad (66)$$

De donde:

$$D = \sqrt[3]{\frac{4V_h}{\pi J}} = mm \quad (67)$$

Donde:

D- diámetro del cilindro

$$S = \frac{V_h}{\pi D^2 / 4} = dm \quad \text{Y fijamos } S=mm \quad (68)$$

Donde:

S-Carrera del pistón

El volumen de trabajo de un cilindro:

$$V_h = \frac{iVh}{i} = \text{Litros} \quad (69)$$

La cilindrada del motor será:

$$iV_n = i_x V_h = \text{Litros} \quad (70)$$

La velocidad media del pistón resultará:

$$v_p = 2Sn = m/s. \quad (71)$$

3.8 Validación del software para el cálculo del ciclo de trabajo del motor desarrollado en Matlab.

El cálculo del ciclo del motor diésel sobrecargado se realizó basado en el software Matlab. Para esto se introdujeron datos principales de un motor y se tomaron los coeficientes necesarios según las recomendaciones del libro Motores de Automóvil.

Tabla 16. Parámetros principales y seleccionados del motor. (Jóvaj, 1987)

Parámetros	Datos	Recomendación de los valores
Potencia efectiva (KW)	1710	—
Revoluciones por minutos del motor (rpm)	900	—
Número de cilindros	9	—
Relación de compresión	17	—
Coficiente de exceso de aire	1.4	—
Exponente politrópico de compresión n_1	1.38	Según la tabla 11 este valor oscila entre 1.32-1.40
Exponente politrópico de expansión n_2	1.23	Según se recomienda en la página 161 este valor oscila entre 1.18-1.28

Coeficiente de amortiguación de la velocidad de la carga	2.8	Según se recomienda en la página 89 este valor oscila entre 2, 5-4
Velocidad de la carga en la válvula de admisión (m/s)	80	Según se recomienda en la página 89 este valor oscila entre 50-130
Presión de los gases residuales (MPa)	0.12	Según se recomienda en la página 91 este valor oscila entre 1,1-1,25
Presión del aire de la carga (MPa)	0.15	–
Diferencial de temperatura en el intercambiador (°C)	15	Según se recomienda en la página 92 este valor oscila entre 20-40
Temperatura de los gases residuales. (K)	793	Según se recomienda en la página 91 este valor oscila entre 700-900
Temperatura del aire de la carga.	323	–
Grado de elevación de la presión.	1.8	–

Las recomendaciones de la tabla anterior fueron tomadas del libro Motores de Automóvil. (Jóvaj, 1987)

En la siguiente figura se muestra la ventana de entrada de datos al software.

Datos	
Potencia efectiva [kW]	1710
Revoluciones por minuto del motor [rpm]	900
Número de cilindros	9
Relación de compresión	17
Coefficiente de exceso de aire	1.4
Exponente politrópico de compresión	1.38
Exponente politrópico de expansión	1.23
Coefficiente de amortiguación	2.8
Velocidad de la carga en la válvula de admisión [m/s]	80
Presión de los gases residuales [MPa]	0.12
Presión del aire de la carga [MPa]	0.15
Diferencial de temperatura en el intercambiador	15
Temperatura de los gases residuales [K]	793
Temperatura del aire de carga [K]	323
Grado de elevación de la presión	1.8

Combustible	
Carbono [%]	0.87
Hidrógeno [%]	0.126
Oxígeno [%]	0.004
Poder calorífico [MJ/kg]	42
Masa molecular del combustible [kmo]	28.96

S/D

S/D > 1 S/D < 1

Calcular Cerrar

Figura 17. Ventana de datos de iniciales.

Luego de introducidos los datos, el software calcula los parámetros de admisión, compresión, combustión y expansión, además de los principales parámetros del ciclo. Los resultados se muestran en la **figura 18**.



Figura 18. Ventana de resultados.

Los resultados obtenidos están dentro de los parámetros requeridos, aunque para el motor sobrealimentado existen parámetros que cambian respecto a motores sin turbocargador, ejemplo de esto es la presión en la admisión, la presión de combustión, la presión media efectiva. Además la presión en el proceso de expansión es mayor en los motores con turbo; es considerable también el aumento en los rendimientos efectivo, indicado y mecánico en los sobrecargados.

3.9 Conclusiones parciales

- Se logró realizar el cálculo del motor sobrealimentado mediante el software Matlab.
- Los resultados del cálculo del motor sobrealimentado a través del software están dentro de los parámetros establecidos en la bibliografía consultada.
- Para el motor sobrealimentado existen parámetros que cambian respecto a motores sin turbocargador, ejemplo de esto es la presión en la admisión, la presión de combustión, la presión media efectiva y otros.

CONCLUSIONES

1. Las principales tecnologías disponibles de Generación Distribuida (GD) a nivel mundial son: las celdas de combustible, turbinas eólicas, paneles y colectores solares, motores de combustión interna, biofuentes de energía (biomasa).
2. La GD tiene grandes ventajas sobre las tradicionales plantas de generación como son: menores pérdidas de transmisión, reducción de las emisiones de gases contaminantes, descongestión de los sistemas de transmisión, mayor fiabilidad del sistema y compensa el suministro de energía en períodos de gran demanda.
3. En la Central Eléctrica de Cayo Santa María los motores empleados en la GD son: Hyundai HIMSEN 9H 21/32, MAN 18V 28/32 S y MTU 4000 16V G81.
4. El fuel oil es el combustible más utilizado, representando el 88.6 % del total de consumo, los motores Hyundai y MAN generaron 67 millones de kWh, con un porcentaje de insumo del 4.2 %, además los motores MTU alcanzaron los 5.2 millones de kWh y un insumo del 5 %.
5. Los consumos específicos de combustible tanto para los motores que consumen fuel oil (228 g/kWh), como para los motores que consumen diésel (229 g/kWh), están por encima de los parámetros establecidos por la UNE, que es 220 g/kWh para motores que consumen diésel y 211.5 g/kWh los motores que consumen Fuel Oil.
6. Se logró realizar el cálculo del ciclo de trabajo del motor sobrealimentado, obteniendo mayores coeficientes de rendimiento en comparación con los motores sin sobrealimentación.

RECOMENDACIONES

1. Continuar con el análisis de la eficiencia energética de la Central Eléctrica de Cayo Santa María para reducir los consumos internos y los costos de operación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA

- BENÍTEZ, F. 1994. *Construcción y Cálculo del automóvil*. La Habana: Editorial Pueblo y Educación.
- CARDWELL, D. 2014. Wind Industry's New Technologies Are Helping It Compete on Price. *New York Times*.
- CHEONHA-DONG Libro de instrucciones del motor de combustión interna Hyundai Himsen 9H21/32. Corea del Sur.
- ELPAÍS 2013. El consumo eléctrico cae al nivel de 2005, pero su precio sube más del 70 %. *El País*.
- GONZÁLES-LONGATT, F. M. 2004. *Tecnologías de Generación Distribuida: Costos y Eficiencias*. [Accessed 09:35 AM 9/11].
- ISO, S. C. 2011. ISO 50001. Available: www.iso.org.
- JÓVAJ, M. S. 1987. *Motores de automóvil*, Moscú, Editorial MIR.
- LÓPEZ, I. I. M. F. 2009. *FACTORES QUE INFLUYEN EN LOS INDICADORES ENERGÉTICOS BÁSICOS EN LOS EMPLAZAMIENTOS DE FUEL OIL EN CUBA*. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- MANB&W Manual de Mantenimiento y Operación de Plantas de Potencias MAN. Alemania.
- MARTÍNEZ, D. R. 2014. *Cálculo del ciclo de trabajo de los motores de combustión interna de la generación distribuida de energía eléctrica*, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- MOROZOV, J. L. R. R. C. P. K. 1983. *Teoría de los motores de combustión interna*. La Habana: Editorial Pueblo y Educación.
- NAVARRO, E. F. 1998. *Influencia de los combustibles en el funcionamiento de los motores de combustión interna*, La Habana, Editorial Pueblo y Educación.
- O.ARAQUE, S. J. F. J. 2005. *El proceso de combustión en MCI*.
- PRECIADO, L. L. Y. A. & PIÑA., L. W. S. 2011. *VÍAS PARA INCREMENTAR LA CALIDAD DEL ÍNDICE DE CONSUMO EN LOS GRUPOS ELECTRÓGENOS DE DIESEL INSTALADOS EN CUBA*. [Online]. Available: <http://www.redalyc.org/home.oa> [Accessed 11/5 2015].
- RÍO, D. T. D. 2014. *Análisis de la generación, disponibilidad y los mantenimientos en la central eléctrica Cayo Santa María*. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- RODRÍGUEZ, R. C. 2010. *PROPUESTA DE UN INDICADOR GENERAL DE GESTIÓN ENERGÉTICA PARA LA EMPRESA DE CIGARRILLOS "JUAN D. MATA REYES"*
- Observatorio de la Economía Latinoamericana* [Online]. [Accessed 9:56 AM 14/5/2015].

RODRÍGUEZ., M. L. La gestión energética y la competitividad empresarial.

ROPER, L. D. 2011. World Photovoltaic Energy. Available: <http://www.roperld.com/science/worldphotovoltaicenergy.htm> [Accessed 11:23 AM 12/4/2015].

UEBCAYOSANTAMARÍA 2014. Control de generación. C.E Cayo Santa María.

UNEVILLA CLARA 2014. REPORTE DE OPERACIONES AL CIERRE DE DICIEMBRE 2014. Empresa Eléctrica Villa Clara.

WWEA. 2010. World Wind Energy Report. Available: http://www.wwindea.org/home/images/stories/worldwindenergyreport2009_s.pdf [Accessed 11:43 AM 4/5/2015].

ANEXOS**Anexo 1:**

Tabla de calor específico molar medio de los gases μ_{cv} a $V = \text{constante}$, en KJ/ (Kmol. °C).

Temperatura, en °C	Aire	O ₂	N ₂	CO ₂	H ₂ O	CO	H ₂
0	0	0	0	0	0	0	0
100	2.015	2.123	2.072	2.981	2.541	2.085	2.064
200	4.195	4.325	4.162	6.347	5.162	4.199	4.153
300	6.364	6.628	6.293	10.031	7.879	6.360	6.242
400	8.591	9.027	8.474	13.975	10.710	8.591	8.348
500	10.890	11.509	10.726	18.129	13.657	10.790	10.467
600	13.255	14.068	13.038	22.462	16.726	13.268	12.602
700	15.684	16.684	15.420	26.950	19.933	15.705	14.767
800	18.171	19.347	17.857	31.560	23.262	18.204	16.965
900	20.708	22.060	20.348	36.270	26.724	20.754	19.201
1000	23.983	24.803	22.881	41.077	30.304	23.350	21.474
1100	25.899	27.578	25.456	45.971	34.001	25.983	23.793
1200	28.554	30.379	28.068	50.911	37.811	28.654	26.152
1300	31.238	33.241	30.714	55.894	41.721	31.346	28.562
1400	33.951	36.065	33.385	60.960	45.720	34.072	31.011
1500	36.689	38.950	36.086	66.086	49.823	36.814	33.498
1600	39.444	41.855	38.799	71.175	53.758	38.578	36.023
1700	42.203	44.799	41.537	76.325	58.238	42.370	38.585
1800	45.008	47.729	44.296	81.517	62.551	45.175	41.177
1900	47.813	50.702	47.059	86.708	66.947	47.981	43.794
2000	50.660	53.716	49.823	90.942	71.343	50.786	46.473
2100	53.507	56.731	52.628	97.175	75.865	53.633	49.153
2200	56.354	59.787	55.433	102.541	80.386	56.480	51.879
2300	59.201	62.844	58.100	107.726	84.950	59.327	54.596

2400	62.090	65.942	61.085	113.002	89.597	62.174	57.359
2500	64.979	69.040	63.890	118.277	94.245	65.063	60.164

entonces las fracciones volumétricas de cada gas que figura en dicha mezcla se determina a base de la formula $r_{sub(i)} = M_i/M_2$ en la cual $\sum r_{sub(i)} = 1$

Anexo 2.

Tabla de energía interna de los gases U (en MJ/kmol).

Temperatura, en °C	Aire	O ₂	N ₂	CO ₂	H ₂ O	CO	H ₂
0	0	0	0	0	0	0	0
100	2.015	2.123	2.072	2.981	2.541	2.085	2.064
200	4.195	4.325	4.162	6.347	5.162	4.199	4.153
300	6.364	6.628	6.293	10.031	7.879	6.360	6.242
400	8.591	9.027	8.474	13.975	10.710	8.591	8.348
500	10.890	11.509	10.726	18.129	13.657	10.790	10.467
600	13.255	14.068	13.038	22.462	16.726	13.268	12.602
700	15.684	16.684	15.420	26.950	19.933	15.705	14.767
800	18.171	19.347	17.857	31.560	23.262	18.204	16.965
900	20.708	22.060	20.348	36.270	26.724	20.754	19.201
1000	23.983	24.803	22.881	41.077	30.304	23.350	21.474
1100	25.899	27.578	25.456	45.971	34.001	25.983	23.793
1200	28.554	30.379	28.068	50.911	37.811	28.654	26.152
1300	31.238	33.241	30.714	55.894	41.721	31.346	28.562
1400	33.951	36.065	33.385	60.960	45.720	34.072	31.011
1500	36.689	38.950	36.086	66.086	49.823	36.814	33.498
1600	39.444	41.855	38.799	71.175	53.758	38.578	36.023
1700	42.203	44.799	41.537	76.325	58.238	42.370	38.585
1800	45.008	47.729	44.296	81.517	62.551	45.175	41.177
1900	47.813	50.702	47.059	86.708	66.947	47.981	43.794

2000	50.660	53.716	49.823	90.942	71.343	50.786	46.473
2100	53.507	56.731	52.628	97.175	75.865	53.633	49.153
2200	56.354	59.787	55.433	102.541	80.386	56.480	51.879
2300	59.201	62.844	58.100	107.726	84.950	59.327	54.596
2400	62.090	65.942	61.085	113.002	89.597	62.174	57.359
2500	64.979	69.040	63.890	118.277	94.245	65.063	60.164

entonces las fracciones volumétricas de cada gas que figura en dicha mezcla se determina a base de la formula $r_{sub(i)}=M_i/M_2$ en la cual $\sum r_{sub(i)}=1$

Anexo 3.

Tabla de calor específico de los productos de combustión (en kJ/kmol.°C)

Temperatura, en °C	Gasolina, siendo α igual a				Aceite Diesel $\alpha=1$
	1.0	0.9	0.8	0.7	
0	22.1849	22.0451	21.8810	21.6845	22.190
100	22.5304	22.3556	22.1502	21.9040	22.525
200	22.8830	22.6762	22.4334	22.1426	22.902
300	23.2899	23.0552	22.7790	22.4480	23.320
400	23.7203	23.4605	23.1459	22.7807	23.739
500	24.1478	23.8772	23.5376	23.1426	24.200
600	24.5828	24.2931	23.9316	23.5095	24.618
700	25.0191	24.7126	24.3315	23.8859	25.079
800	25.4382	25.1173	24.7191	24.2530	25.498
900	25.8439	25.5088	25.0967	24.6122	25.874
1000	26.2261	25.8806	25.4548	24.9534	26.293
1100	26.5899	26.2355	25.7948	25.2698	26.628
1200	26.9370	26.5726	26.1230	25.5950	27.005
1300	27.2636	26.8896	26.4306	25.8912	27.298
1400	27.5722	27.1808	26.7235	26.1738	27.633
1500	27.7840	27.4646	26.9993	26.4402	27.884
1600	28.1340	27.7300	27.2578	26.6905	28.177

1700	28.3928	27.9833	27.5047	26.9295	28.428
1800	28.6314	28.2180	27.7337	27.1518	28.638
1900	28.8604	28.4420	27.9527	27.3647	28.889
2000	29.0752	28.6526	28.1587	27.5649	29.098
2100	29.2812	28.8546	28.3564	27.7548	29.308
2200	29.4755	29.0455	28.5432	27.9386	29.517
2300	29.6555	29.2299	28.7173	28.1099	29.584
2400	29.8284	29.3930	28.8845	28.2732	29.852
2500	29.9905	29.5528	29.0415	28.4271	30.019

Anexo 4

Tabla de energía interna de los productos de combustión U (en MJ/kmol).

Temperatura, en °C	Gasolina, siendo α igual a				Aceite Diesel $\alpha=1$
	1.0	0.9	0.8	0.7	
0	0	0	0	0	0
100	2.2530	2.2045	2.1881	2.1685	2.252
200	4.5766	4.5352	4.4867	4.4285	4.58
300	6.3969	6.9165	6.8337	6.7344	6.992
400	9.4881	9.3842	9.2584	9.1123	9.483
500	12.0740	11.9386	11.7688	11.5713	12.100
600	14.7500	14.5759	14.3590	14.1057	14.779
700	17.513	17.2989	17.0422	16.7202	17.585
800	20.3090	20.0938	18.7753	19.4024	20.390
900	23.2600	22.9688	22.5870	22.1510	23.237
1000	26.2262	25.8806	25.4548	24.9534	26.293
1100	29.2490	28.8569	28.3743	27.7968	29.309
1200	32.3250	31.8871	31.3476	30.7140	32.406
1300	35.4430	34.9565	34.3598	33.6586	35.504
1400	38.6010	38.0531	37.4129	36.6433	38.686
1500	41.6760	41.1969	40.4990	39.6603	41.868

1600	45.0140	44.3680	43.6125	42.7048	45.008
1700	48.2680	47.5716	46.7580	45.7802	48.358
1800	51.5370	50.7924	49.9207	48.8732	51.498
1900	54.8350	55.0398	53.1101	51.9929	54.931
2000	58.1500	57.3052	56.3174	55.1298	58.197
2100	61.4910	60.5947	59.5484	58.2851	61.546
2200	64.8460	63.9001	62.7955	61.4671	64.979
2300	68.2080	67.2127	66.0498	64.6528	68.287
2400	71.5880	70.5432	69.3228	67.8557	71.594
2500	74.9760	73.382	72.6038	71.0678	75.027