

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Mecánica

CEETA



TRABAJO DE DIPLOMA

**Potenciales de cogeneración en la
central de grupos electrógenos de fuel
oil Santa Clara 110 kV.**

Autor: William Pérez Delgado

Tutores: Dr. C Víctor Samuel Ocaña Guevara.

Dr. C Hidalberto Herrera Moya

Curso 2016-2017

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 en Automática, 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

Pensamientos

Si buscas resultados distintos no hagas siempre lo mismo.

Albert Einstein

Nuestra recompensa se encuentra en el esfuerzo y no en el resultado. Un esfuerzo total es una victoria completa.

Mahatma Gandhi.

Aprender sin reflexionar es malgastar la energía.

Confucio

Dedicatoria

Los logros son el resultado de un arduo trabajo, el mérito corresponde a todos los involucrados, así dedico la tesis:

A mi madre por ser mi conciencia, la guía a través de mi vida, por confiar en mí siempre, la guerrera de mis batallas.

A mi padre por ser la fortaleza y constancia en momentos difíciles, por ser un ejemplo que seguiría con orgullo.

A mi familia en general, por su apoyo incondicional y por compartir conmigo los buenos y malos momentos.

Agradecimientos

En primera instancia agradezco a mi familia por su ayuda y guía en mi proceso de formación como un profesional.

Agradezco a mis formadores, personas de gran sabiduría quienes se han esforzado por ayudarme a llegar al punto en el que me encuentro y gracias a las ganas de trasmitirme sus conocimientos y dedicación que los ha regido, he logrado importantes objetivos como culminar el desarrollo de mi tesis con éxito y obtener una afable titulación profesional.

Resumen

En el presente trabajo se realizó un estudio de la central Santa Clara 110 kV con vistas a identificar potencialidades para la cogeneración. Se describió los motores de combustión interna de fuel oil utilizados en el emplazamiento, se analizó el consumo de combustible en la central eléctrica para diferentes regímenes de carga, determinando las emisiones contaminantes, específico de los gases de escape. Se estableció una Metodología para el balance térmico del motor Himsen Hyundai 1,7 MW y caldera recuperativa, identificando potenciales de calor producto de la combustión, además se realizó un balance exergético para determinar que parte de ese calor se encuentra disponible para para la cogeneración.

Abstract

Presently work was carried out a study of the power station Santa Clara 110 kV with a view to identifying potentialities for the cogeneration. The motors of internal combustion of fuel oil used in the location was described, the consumption of fuel was analyzed in the electric power station for different load regimen, determining the polluting emissions, specific of the escape gases. A Methodology settled down for the thermal balance of the motor Himsen Hyundai 1,7 MW and recuperative boiler, identifying potentials of heat product of the combustion, he/she was also carried out a balance exergético to determine that it leaves of that heat it is available for the cogeneration.

Índice

Pensamientos.....	3
Dedicatoria.....	4
Agradecimientos.....	5
Resumen.....	6
Capítulo I: Estado del arte.....	13
1.1 Introducción.....	13
1.2 Caracterización de los aceites combustibles.	13
1.2 Descripción de los motores de combustión interna de fuel oil utilizados en la Central Santa Clara 110kv.	14
1.4 Impacto Ambiental.	17
1.4.1 Principales contaminantes.	18
1.4.2 Riesgos a la salud en zonas contaminadas cercanas a la fuente de emisión.....	19
1.5 Razón electricidad y calor (rq/kW).	19
1.6 Criterios para la aplicación de sistemas de cogeneración.	20
1.6.1 Cogeneración con grupos electrógenos en Cuba.	21
1.6.2 Propuestas de consumidores de los servicios que brinda la cogeneración.	22
1.6.3 Propuestas de tecnologías para la cogeneración.	23
Capítulo II: Descripción de la Metodología utilizada para determinar el potencial de calor residual y la disponibilidad de ese valor en la planta.....	28
2.1 Análisis del régimen de carga en la central eléctrica.	29
2.2 Análisis de generación y consumo en planta.	31
2.3 Análisis de los indicadores técnicos productivos año 2016.....	32
2.4 Consumo de combustible.....	32
2.5 Descripción de los problemas identificados en Planta que afectan principalmente los índices de consumo.	33
2.6 Metodología para el balance térmico de los motores de combustión interna en la generación distribuida.	36
2.7 Metodología para el balance térmico de las calderas recuperativas en la generación distribuida.	39
2.8 Metodología para el balance exergético.	43
2.3 Metodología para el cálculo y fundamentos de los análisis propuesto.	46
Capítulo III: Análisis de los resultados.....	47
3.1 Resumen del régimen de carga del 2016.....	47
3.2 Generación anual de electricidad.....	52

3.3	Impacto Ambiental.....	52
3.4	Balance térmico del motor.....	54
3.5	Balance térmico del agua en la caldera recuperativa.....	56
3.6	Balance térmico del combustible en el HTU.....	56
3.7	Balance térmico de los gases de escape en la caldera.....	58
3.8	Resultados obtenidos mediante el software (EES), Engineering Equation Solver.....	58
	Conclusiones.....	63
	Recomendaciones.....	64
	Bibliografía.....	65
	Anexos.....	67

Introducción

Es conocido que los países industrializados generan la mayoría de su electricidad en grandes instalaciones centralizadas como ejemplo centrales de combustible fósil (carbón, gas natural) nucleares o hidroeléctricas (Marsdon 2006), debido a que estas centrales presentan excelentes rendimientos económicos, transmiten la electricidad normalmente a muy grandes distancias y el rendimiento energético y medioambiental es bajo (Garrido , TURTÓS 2004). Las centrales eléctricas se ubican en lugares determinados en función de ciertos factores económicos, de seguridad, logísticos o medioambientales, entre otros, que provocan que la mayoría de las veces la energía se genere muy lejos de donde se consume (Distribuida 2008, Torres 2010, Herrera mayo del 2009), Según estos autores dichas centrales para la generación de electricidad por lo general se construyen cerca de las zonas de obtención de los combustibles fósiles y lejos de las ciudades donde mayor sería el consumo de electricidad por motivos de contaminación atmosférica.

Con el uso de la generación distribuida se reduce la cantidad de energía que se pierde en la red de transporte de energía eléctrica ya que la electricidad se genera muy cerca de donde se consume. Esto hace que también se reduzcan el tamaño y número de las líneas eléctricas que deben construirse y mantenerse en óptimas condiciones. (Marsdon 2006)

En Cuba durante el año 2005 la dirección del país 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.(Herrera mayo del 2009) Actualmente la generación distribuida en nuestro país ha alcanzado gran confiabilidad y desempeño energético siendo este el segundo país en el mundo con mayor porcentaje de generación eléctrica distribuida, respecto a su capacidad total instalada. Garantiza, mediante grupos electrógenos el 48 % de su electricidad, superada solamente por Dinamarca, que alcanza el 53 %.(Distribuida 2008). Como alternativa que promueve aumentar el rendimiento surge el término cogeneración ampliamente

explicado por autores como (Avella , Garrido , Madrid 2010, Luís Manuel García Rojas and González Ortega 2011, MARTÍN NUÑEZ 2013, Magán 2004)

Donde se explica que las plantas de cogeneración utilizan la pérdida de calor en la generación de electricidad para diversos procesos de energía, la pérdida de calor o calor residual de un proceso dado su potencial puede aprovecharse mediante diferentes sistemas según el servicio requerido, entre los cuales destaca la producción de frío/calor simultáneamente o generación de electricidad. La variedad y aplicación está determinada por las tecnologías implementadas.(GDECU)

Entre los elementos comunes a cualquier planta de cogeneración se encuentran la Fuente de energía primaria (suele ser gas natural, gasóleo o fuelóleo). El elemento motor es el elemento encargado de convertir energía térmica o química en mecánica que dependiendo del tipo de planta, puede tratarse de turbinas de gas, turbinas de vapor o motores alternativos.(Romero 2011)

Conocido que la cogeneración en la generación distribuida es una alternativa que promueve aumentar la eficiencia, pero que depende principalmente de la cantidad de energía residual que se obtiene del proceso de generación de electricidad con motores de combustión interna. Dicha energía residual se manifiesta en forma de calor y donde mayor potencial térmico existe es el que se rechaza mediante los gases de escape, conocer el potencial térmico contenido en esos gases de escape da la medida de cuanto pudiese recuperarse o reutilizarse en el mismo proceso de generación de electricidad, así como las potencialidades de la planta para la cogeneración.

Determinar el potencial de energía residual en la generación distribuida para la cogeneración sería un paso hacia el desarrollo energético, eficiente, sostenible y medioambiental.

Teniendo en cuenta lo planteado anteriormente en este trabajo se presupone la siguiente hipótesis:

Si se determinase el potencial térmico contenido en los gases de escape en las plantas de potencia a base de Grupos Electrónicos de Fuel Oil, cuanto pudiese aprovecharse para la cogeneración.

Partiendo de la hipótesis se propone el siguiente Objetivo General:

Determinar potenciales térmicos en la planta de potencia a base de grupos electrónicos de fuel oil Santa Clara 110kV, evaluando su potencial para la cogeneración.

Para darle cumplimiento a este Objetivo General se proponen las siguientes tareas:

1. Realizar una revisión bibliográfica que permita conocer el estado del arte de esta temática en el mundo.
2. Caracterizar la central Santa Clara 110kV en cuanto a índices de consumo de combustible para diferentes regímenes de carga, así como la disponibilidad real del emplazamiento en cuanto al tiempo de trabajo planificado.
3. Realizar el balance térmico del motor Hyundai 1.7 MW con la finalidad de identificar el potencial térmico existente en los gases de escape producto de la combustión.
4. Realizar el balance térmico en las calderas recuperativas determinado el potencial existente en los gases de escape procedentes del motor que se rechazan a través de la chimenea.

Capítulo I: Estado del arte.

1.1 Introducción.

El presente trabajo se desarrolla en Cuba, específicamente en la ciudad de Santa Clara, capital del sistema urbano de la provincia Villa Clara donde se encuentran en operación dos plantas de generación distribuida de electricidad a base de fuel oil. Se estudiará a continuación la que se encuentra ubicada en la zona noroeste de la ciudad y se identifica como “Unidad de generación distribuida fuel oil Santa Clara 110 kV, se localiza en Carretera Subplanta y Circunvalación. Esta central eléctrica comenzó su fase de explotación el primero de Junio de 2008, surge por la necesidad del país de generación de electricidad.(Moya Diciembre de 2011) (Ver Anexo1)

Santa Clara 110kV, central para la generación de electricidad mediante Motores-Generadores Hyundai, Sur Corea, con capacidad de generación de 1.7 MW cada uno y 4 200 V. La central cuenta con 12 motores-generadores, tres plantas de tratamiento de combustible pesado (HTU), donde se purifica el Fuel Oil, se eleva la temperatura para bajar la viscosidad y se limpia el aceite de lubricación de los motores para volverlo a utilizar, como consecuencia de la purificación se produce un subproducto llamado Lodo que es llevado a un tanque de 100 000 litros donde luego de ser drenada toda el agua se saca fuera de la central en pailas, además cuenta para el proceso con una estación de recepción del combustible, una planta de tratamiento de agua, tres Calderas Recuperativas y tres estaciones de Compresores. El sistema de tratamiento eléctrico consta de tres contenedores de media tensión, tres Transformadores de 8.5 MVA y la Sala de Control Remoto. (Moya, Diciembre de 2011)(Ver anexo 2)

1.2 Caracterización de los aceites combustibles.

En estas plantas cuya tecnología es Himsen Hyundai el funcionamiento de los motores está determinado por el combustible primario usado, en este caso es el fuel oil, el cual de acuerdo a sus características según (Torres 2010) , presenta gran viscosidad encareciendo su manejo y combustión, para ello en la instalación el funcionamiento de los motores se inicia con diésel hasta alcanzar

temperaturas que propicien el precalentamiento del fuel oil antes de ser consumido en los motores.

Para lograr un correcto uso del fuel oil éste debe estar dentro de ciertos límites de viscosidad para minimizar los requerimientos de ajustes en el quemador. Si la viscosidad del combustible en el quemador es demasiado alta, la atomización es pobre y hay una depresión excesiva de carbono, si la viscosidad es muy baja ocurre el retroceso y puede resultar un quemado errático. La viscosidad también está relacionada con las precisiones de bombeo del combustible y con los costos de bombeo y es de primordial importancia para los grados más pesados que requieren de precalentamiento antes de ser quemados. (Torres 2010)

1.2 Descripción de los motores de combustión interna de fuel oil utilizados en la Central Santa Clara 110kv.

Las características principales de estos motores fueron facilitadas por (CUNALATA 2013, National Electric Union 2010). En las tablas 1 y 2 se dan los principales parámetros de dicha tecnología.

Tabla 1: Principales características de las unidades de generación Hyundai de 1.7 MW.

Tecnología	Características	Especificaciones
Himsen Hyundai	Modelo del Motor	Himsen Hyundai /9H21
	Diámetro interior	210 mm
	Carrera del pistón	320 m/s
	Diámetro del pistón por cilindro	210 mm
	Velocidad media del pistón	9.6 m/s
	Peso total del motor Longitudes del motor	50 ton 2.4x3.4x12 m
	Consumo de combustible	187-193 g/kWh
	Potencia.	1710 kW
	Tiempo de mantenimiento	12000 h
	Frecuencia	60 Hz

Tabla 2: Parámetros principales del motor Hyundai /9H21 (National Electric Union 2010).

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.	
Temp. 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

El diseño de la planta referente a la distribución de los motores queda establecido por baterías constituidas cada una por 4 motores. Una Batería cuenta con:

1. Una unidad de tratamiento de combustible (HTU) por sus siglas en Inglés donde se purifican y se le da tratamiento térmico al Fuel Oil que es el combustible con el que trabajan regularmente los motores y al aceite de lubricación de los mismos.
2. Cuatro unidades motor-generator (MDU) por sus siglas en Ingles. Es aquí donde ocurre el proceso de generación de energía eléctrica partiendo de energía mecánica, para ello se tiene un generador y un motor de combustión interna, el cual presenta los mismos sistemas convencionales como cualquier otro motor diésel como son:
 - Sistema de combustión.
 - Sistema de aire.
 - Sistema de agua de enfriamiento.
 - Sistema de aceite de lubricación.

Pero con algunas modificaciones tales como:

- 1- Un Turbo Compresor con el objetivo de aprovechar los gases de escape del mismo en mover una turbina y esta a su vez mover un compresor para producir el aire de carga necesario para la combustión.
- 2- Un sistema de control automático el cual le permite mantener un correcto funcionamiento del equipo, con las protecciones pertinentes para alargar la vida útil de estos.
- 3- Una bomba de inyección por cada cilindro, acoplados a un gobernador el cual regula la entrada del combustible requerido de acuerdo al por ciento de carga.

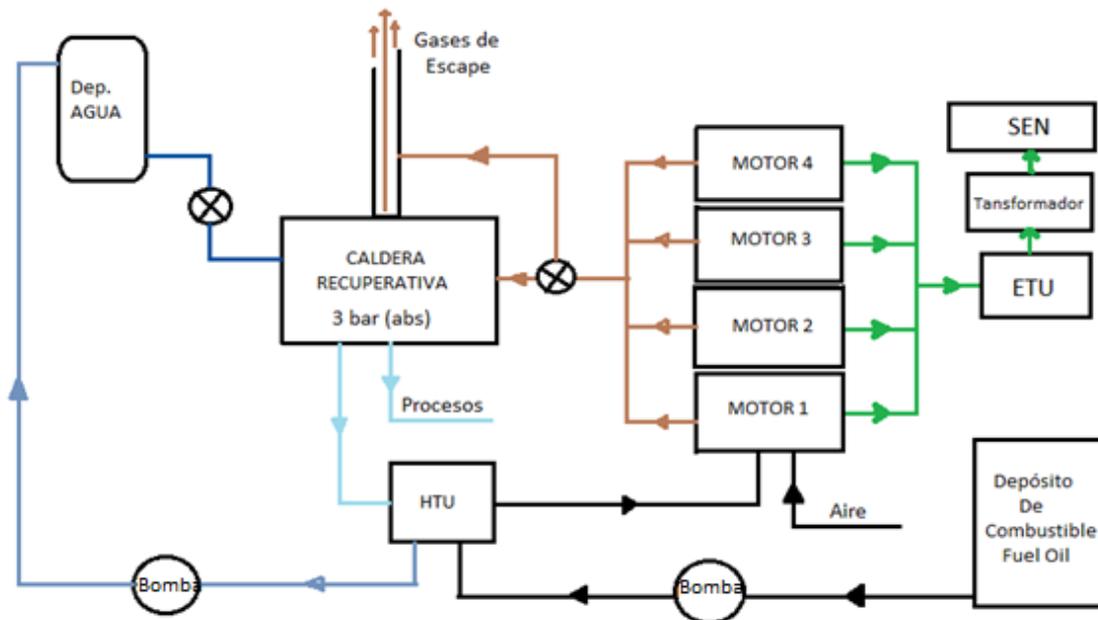


Figura 1: Esquema general de una batería.

El principio de funcionamiento es el siguiente: una vez enviado el combustible desde los (HTU) unidad de tratamiento de combustible, llega en los motores a cada una de las bombas de inyección donde comienza la combustión interna del mismo, el cual ya en funcionamiento le da movimiento por medio de una transmisión al generador que es el encargado de generar la corriente eléctrica, la cual pasa a las Unidades de Tratamiento Eléctrico (ETU) donde se sincronizan cada uno de los generadores, se les regula el por ciento de carga según las necesidades y se envía esta energía eléctrica a la red nacional por mediación de los transformadores de salida. (Torres 2010)

1.4 Impacto Ambiental.

Para lograr establecer una valoración y tener un control acerca de la contaminación atmosférica, es necesario tener en cuenta las emisiones de contaminantes procedentes de disímiles fuentes. La calidad del aire que exista en un área determinada depende en gran medida de la emisión de contaminantes vertidos a la atmósfera por una o más fuentes. Para conocer la intensidad de las emisiones existen al menos tres alternativas: el Balance de masa, los Factores de emisión y la Medición de las emisiones.

El balance de masa permite contabilizar las corrientes de sólidos, líquidos o gases que entran y salen al proceso completo o de una determinada unidad del mismo, mediante la simulación teórica de las reacciones químicas que se llevarían a cabo en el proceso de combustión. Este método es utilizado para establecer la influencia de diferentes parámetros del proceso en los niveles de emisión y para detectar errores importantes en los resultados experimentales (Cinemat 1991).

Factores de emisión: son valores (índices) obtenidos a partir de balances de masa o de resultados de medidas reales, normalizadas por algún factor (masa, energía o producto) que caracteriza el tamaño del proceso o foco de emisión. En general, proporcionan un procedimiento rápido y útil de estimación de las emisiones. Pueden emplearse para detectar errores importantes en resultados de muestreo o como indicativo de la emisión potencial, de un contaminante a partir de una fuente de emisión. No son límites o estándares de emisión, debido a que representan, esencialmente, un promedio del rango de la tasa de emisión, para una tecnología y un combustible determinado (Cinemat 1991).

La medición directa permite incorporar todas las características diferenciales de la fuente y contaminantes, es la forma más compleja, costosa y confiable de determinar las emisiones, aunque no está exenta de errores. En términos generales, la calidad de los resultados de un programa de medida lo determina el efecto combinado de la precisión del equipo de muestreo, la técnica analítica, la calibración de los equipos de medición y el proceso de cálculo. En la práctica, la limitación más significativa se encuentra asociada a la disponibilidad de equipos certificados, personal calificado y el costo mismo de los muestreos (Cinemat 1991).

1.4.1 Principales contaminantes.

SO₂: Dióxido de azufre, gas estable, no inflamable, no explosivo e incoloro que puede detectarse por el gusto en concentraciones de 1.000µg/m³ o por el olfato a concentraciones superiores a los 10.000µg/m³. Este gas se produce mediante la quema de combustible fósiles que contienen azufre.

NO_x: óxidos de nitrógeno, valor medio entre el monóxido de nitrógeno (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂), este último es un gas de color café rojizo y olor picante.

CO: Monóxido de carbono, gas incoloro e inodoro, la causa principal de su emisión está dada por la combustión incompleta.

PM₁₀: Material particulado inhalable en suspensión con un diámetro aerodinámico menor o igual a 10 µm.

PM_{2.5}: Material particulado fino con un diámetro aerodinámico menor o igual a 2.5 µm. Permanecen en la atmósfera durante períodos largos de tiempo debido a sus bajas velocidades de sedimentación. (Pedroso, 2010)

1.4.2 Riesgos a la salud en zonas contaminadas cercanas a la fuente de emisión.

Los efectos de la exposiciones agudas y más a menudo crónicas, a los contaminantes atmosféricos antes mencionados, pueden dar lugar a: disminución del rendimiento físico, mayor incidencia de síntomas respiratorios, deterioro de la función pulmonar, tanto en los niños, como en la población adulta supuestamente sana, agudización de las manifestaciones clínicas e incremento de la mortalidad en personas con neuropatías o cardiopatías crónicas y en ancianos, incremento de la prevalencia y mortalidad por asma bronquial y de enfermedades pulmonares obstructivas crónicas y la incidencia de cáncer pulmonar. (Pedroso, 2010)(Moya, Diciembre de 2011)(TURTÓS, 2004)

1.5 Razón electricidad y calor (rq/kW).

Para seleccionar sistemas de cogeneración, uno debe considerar algunos parámetros técnicos importantes que ayudan a definir el tipo y funcionamiento del sistema de cogeneración. Cociente de energía del calor es uno de los parámetros técnicos más importantes que influyen en la selección del tipo de sistema de cogeneración. El cociente de la energía del calor de una instalación debe coincidir con las características del sistema de cogeneración para instalarse. Se define como el cociente de la energía térmica a electricidad requerido por la energía que consume la instalación. Aunque puede ser

expresada en diferentes unidades Btu/kWh, kCal/kWh, lb./hr/kW, etc., aquí se presenta sobre la base de la misma unidad de energía (kW). Ratios básicos de energía del calor de los diferentes sistemas de cogeneración se muestran en la tabla 3, junto con algunos parámetros técnicos. (National Electric Union, 2010 TURTÓS, 2004, Luís Manuel García Rojas, 2011)

Tabla 3: Ratios básicos de energía del calor de los sistemas de cogeneración.

Sistemas de cogeneración	Razón Calor/electricidad [kW_{th}/kW_e]	Potencia de salida (kW)	Eficiencia total (%)
Turbina de contra presión	4.0-14.3	14-28	84-92
Turbina Extracción - Condensación	2.0-10.0	22-40	60-80
Turbina de Gas	1.3-2.0	24-35	70-85
Ciclo combinado	1.0-1.7	34-40	69-83
Motores estacionarios	1.1-2.5	33-53	75-85

Cogeneración utiliza un proceso único para generar electricidad y calor útil tanto enfriamiento. Las proporciones de calor y energía (calor: la relación de poder) varían de un sitio a otro, por lo que se debe seleccionar cuidadosamente el tipo de planta y esquemas de funcionamiento adecuadas para que coincida con las demandas lo más cerca posible. La planta por lo tanto puede establecerse hasta suministro de parte o todas las cargas de calor y electricidad de sitio, o un exceso de cualquiera de ellos puede ser exportado si un cliente conveniente está disponible.

1.6 Criterios para la aplicación de sistemas de cogeneración.

Las aplicaciones de la cogeneración implican principalmente una correcta planificación de las instalaciones. Se pretende ajustar la producción de energía eléctrica con el uso del calor recuperado. Técnicamente la cogeneración es aplicable a cualquier empresa, industrial o del sector comercial y de servicios, que tenga requerimientos de energía eléctrica y de energía térmica útil (vapor, gases calientes, aire caliente, agua caliente, agua helada y/o aire acondicionado). (Martínez, M. I. R. M., M. I. I. L. Díaz, et al. (Septiembre 2008))

Dichos autores plantean una serie de requisitos preliminares para la instalación de sistemas de cogeneración entre los cuales destacan que:

- Se debe tener claro el uso que se le va a dar al calor obtenido por cogeneración. Una utilidad es producir agua caliente, tanto sanitaria como para circuitos de calefacción. Mediante máquinas de absorción es posible obtener también frío para climatización, a partir del calor cogenerado. Esta tecnología puede ser utilizada para la climatización de edificios.
- Obtener vapor a temperaturas (60-120 °C), para usos industriales específicos: lavanderías, industria alimentaria, química o de tintado y curtidos.
- El usuario de los servicios de la cogeneración opere más de 5000 horas anuales.

1.6.1 Cogeneración con grupos electrógenos en Cuba.

En Cuba la finalidad del empleo de grupos electrógenos (GE) basados en motores alternativos de combustión interna de diferentes tamaños, características y de combustibles, principalmente combustible diésel y destilado pesado (fuel oil), es el de abastecer la demanda energética nacional, dada las especificaciones de la generación distribuida, antes expuestas se valoran las mismas como unidades de generación eléctrica y de potencia residual térmica simultáneamente. Aunque estos sistemas no fueron previstos con este fin, poseen energías que se pudieran recuperar mediante sistemas de cogeneración aunque esta última no es del todo explotada al máximo, porque es utilizada solo una fracción del potencial térmico para el tratamiento del combustible mediante el HTU (Unidad de tratamiento térmico del combustible).

En la tabla 4 se muestra la cantidad de energía térmica que se desperdicia en los grupos electrógenos, que mediante sistemas de cogeneración se podrían emplear para la producción de agua caliente, vapor y/o frío.

Tabla 4: Balances de energía en los grupos electrógenos utilizados en Cuba.

Marca	Comb.	Pot. (MW)	Q_g (MW)	Q_{ref} (MW)	Q_{rest} (MW)	Q_{comb} (MW)
Hyundai	Fuel oil	1.45	1.32	0.56	0.10	3.48
MAN	Fuel oil	3.7	3.00	1.26	0.23	7.88
MTU	Diesel	1.37	1.43	0.60	0.31	3.76
Guascor	Diesel	0.58	0.63	0.27	0.16	1.66
Scania	Diesel	0.26	0.27	0.11	0.06	0.70

Fuente: Martínez, M. I. R. M., M. I. I. L. Díaz, et al. (Septiembre 2008). Perspectivas del aprovechamiento masivo del calor de desecho de las baterías de grupos electrógenos. GRUPO DE ESTUDIOS DE COGENERACIÓN, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.

De la tabla 4 se aprecia que donde mayor potencial existe es en la tecnología MAN porque presentan una potencia de 3,4 MW, para el desarrollo de este trabajo la tecnología estudiada es Himsen Hyundai de 1,7 MW referente a la utilizada en la central Santa Clara 110 kV.

1.6.2 Propuestas de consumidores de los servicios que brinda la cogeneración.

Teniendo en cuenta la localización de la planta y los servicios que pudiese brindar, los candidatos a analizar serian.

1. Almacenes frigoríficos.
2. Industrias conserveras de ciclo anual.
3. Fabricación de hielo.
4. Mataderos.
5. Empacadoras de cárnicos.
6. Lavandería.

Entre los diferentes potenciales consumidores destacan 2 en particular, el acondicionamiento de aire en la planta mediante máquinas de absorción y la Empresa el UEB Matadero Chichi Padrón la cual requiere vapor para diversos procesos.

Se conoce que el mayor potencial térmico lo contiene los gases de escape Q_g , del motor y solo una fracción de él es recuperada a través de la caldera, por tanto para aprovechar eficientemente dicho potencial es necesario rehacer las calderas de manera que disminuya la temperatura de los gases calientes a la salida de la chimenea sobre los 120 – 140 °C, temperatura que debe garantizarse porque los gases de combustión no deben enfriarse por debajo de su punto de rocío ácido a fin de evitar condensaciones que faciliten la corrosión.

1.6.3 Propuestas de tecnologías para la cogeneración.

A) Máquinas de absorción.

La máquina de absorción se define como una máquina frigorífica que emplea como ciclo de trabajo el ciclo de absorción, estas se integran dentro del mismo grupo de producción de frío que las convencionales de compresión ya que el efecto de refrigeración lo consiguen por evaporación de un líquido a baja presión, la diferencia de estas tecnologías de producción de frío es utilización de lo que llamaremos compresor térmico por un compresor mecánico, necesario para la recuperación de los vapores formados durante el paso de líquido a vapor.(PIEDRAHITA, 2009)

Las máquinas de absorción pueden ser de simple efecto, doble efecto y triple efecto, se encuentran en el mercado en el rango desde 4,5 kW de potencia frigorífica llegando a grandes cantidades de kW y con coeficiente de operación COP de entre 0.6 y 0.75 en máquinas de simple efecto que son las más utilizadas.

Las temperaturas de las fuentes de calor para la activación de estas máquinas están en el rango de entre 90 y 120°C en simple efecto, donde tenemos las máquinas de $\text{BrLi}-\text{H}_2\text{O}$ y $\text{NH}_3-\text{H}_2\text{O}$. También existen máquinas de doble efecto, con una temperatura de activación mayor, entre 130 y 185°C lo que se traduce en una mejora del rendimiento del equipo, encontrándose el coeficiente de operación en un rango de entre 0.9 y 1.33. Estas máquinas están disponibles en potencias de refrigeración superiores a 100 kW. (Luís Manuel García Rojas, 2011)

Las enfriadoras de triple efecto se encuentran todavía en etapa experimental aunque ya existen instalaciones, que pueden alcanzar un COP de hasta 1.7 operando con temperaturas de activación en el rango de 170 a 200°C.

B) Calderas de Recuperación.

Una caldera es un aparato a presión, donde el calor procedente de un combustible o de otra fuente de energía se transforma en energía térmica, utilizable a través de un fluido caloportador en fase líquida o vapor. Las calderas que se utilizan en las plantas de cogeneración son calderas que recuperan el calor contenido en los gases de escape de la máquina térmica de combustión (motor o turbina de gas). En ellas se calienta agua, que se convierte en vapor y que se utiliza para mover una turbina de vapor y/o como fluido caloportador que aporta calor a alguna fase del proceso industrial al que está asociada la planta de cogeneración. Son el elemento de unión entre la generación de electricidad y la generación de calor útil. (Martínez, Otaola, Cid, Cerdeira, 2012)

Los parámetros más importantes que definen las características de un generador de vapor son los siguientes:

❖ **Presión efectiva:**

En la práctica se suelen clasificar en:

- Baja presión $p < 20 \text{ kg/cm}^2$
- Media presión $20 \text{ kg/cm}^2 < p < 64 \text{ kg/cm}^2$
- Alta presión $p > 64 \text{ kg/cm}^2$

❖ **Capacidad**

Se suele medir por el caudal de vapor (toneladas por hora, t/h) producido a una presión y temperatura determinadas, para una temperatura dada del agua de alimentación de la caldera. A veces se indica por la potencia térmica aprovechada o del combustible.

❖ **Superficie de calefacción**

Es la superficie a través de la cual tienen lugar los procesos de transmisión de calor (gases calientes-agua/vapor). Puede dividirse en:

- Superficie de transmisión directa: en ella es dominante la transmisión de calor por radiación.
- Superficie de transmisión indirecta: en ella es dominante la transmisión de calor por convección.

La superficie de calefacción está limitada en cuanto a sus dimensiones por los siguientes factores:

- Los gases de combustión no deben enfriarse por debajo de su punto de rocío ácido a fin de evitar condensaciones que faciliten la corrosión (en combustibles con contenido de azufre significativo, como carbón o fuel esta temperatura está en el entorno de 140 °C, mientras que en las calderas de gas natural esta temperatura es de 50-60 °C)
- Un enfriamiento excesivo de los gases calientes conlleva una pérdida de tiro en el caso de calderas de tiro natural, debiéndose de introducir un mecanismo de tiro forzado.
- Una vez que los gases calientes se enfrían por debajo de cierta temperatura un aumento de superficie de transmisión es poco rentable pues la cantidad de calor disponible es muy pequeña (la transferencia de calor está en relación directa con el salto térmico).

❖ **Producción específica de vapor**

Es la relación entre la producción de vapor y la superficie de calefacción.

❖ **Índice de vaporización**

Es la masa de vapor producida por unidad de masa de combustible utilizado para su producción (depende del rendimiento basado en el PCI del combustible utilizado). El índice de vaporización es el inverso del consumo específico de combustible, definido como la masa de combustible que utiliza la caldera para

producir una unidad de masa de vapor, en las condiciones nominales de trabajo (presión y temperatura del vapor determinadas y una temperatura del agua de alimentación dada).

Las partes fundamentales de una caldera son:

- Cámara de combustión u hogar, donde se realiza la combustión
- Cuerpos de intercambio, donde se transfiere el calor de los gases calientes al fluido caloportador.
- Quemadores
- Envolvente o carcasa que aísla el cuerpo intercambiador del exterior.
- Conjunto de elementos auxiliares y de control de la caldera

Las calderas pueden ir dotadas de los siguientes componentes externos o no al cuerpo de la misma:

- Economizador: Intercambiador de calor que precalienta el agua de entrada a la caldera, tomando calor de los humos o gases de escape.
- Recuperadores o regeneradores de calor: Intercambiadores de calor, que precalientan el aire de entrada a la cámara de combustión a partir de los gases de escape.

Las calderas pueden clasificarse atendiendo a distintos conceptos:

- Por la fuente de energía utilizada:
 - Calderas de combustión, en las que el calor proviene directamente de la combustión de un combustible.
 - Calderas de recuperación, en las que el calor procede de un fluido a alta temperatura (gases calientes).
 - Calderas mixtas. En el caso de estar situadas en el escape de turbinas de gas, algunas calderas suelen incorporar también un quemador, con lo que son simultáneamente de recuperación y combustión.
- Por el fluido caloportador:

- Calderas de agua caliente.
- Calderas de agua sobrecalentada
- Calderas de fluidos térmicos.
- Calderas o generadores de aire caliente.
- Calderas de vapor
- Dentro de los generadores de vapor se distinguen:
 - Calderas de vapor saturado
 - Calderas de vapor sobrecalentado
 - Por el material constructivo:
 - Calderas de fundición
 - Calderas de acero
- Por el tipo de tiro:
 - Tiro natural (hogar en depresión).
 - Tiro forzado (cámara de combustión presurizada).
- Por el tipo de circulación:
 - Circulación natural
 - Circulación forzada
- Por su disposición:
 - Horizontales. La dirección del flujo de gases es horizontal y los haces tubulares se disponen transversalmente, es decir, son verticales.
 - Verticales. La dirección del flujo de gases es vertical, mientras que los haces tubulares se disponen transversalmente, es decir, son horizontales o inclinados.

La selección de la caldera estará determinada por el servicio que se desee brindar, los requerimientos del mismo, tanto temperatura como, presión y flujo de vapor, de manera que sea posible la cogeneración una vez propuestas las tecnologías para su implementación como sistema.

Capítulo II: Descripción de la Metodología utilizada para determinar el potencial de calor residual y la disponibilidad de ese valor en la planta.

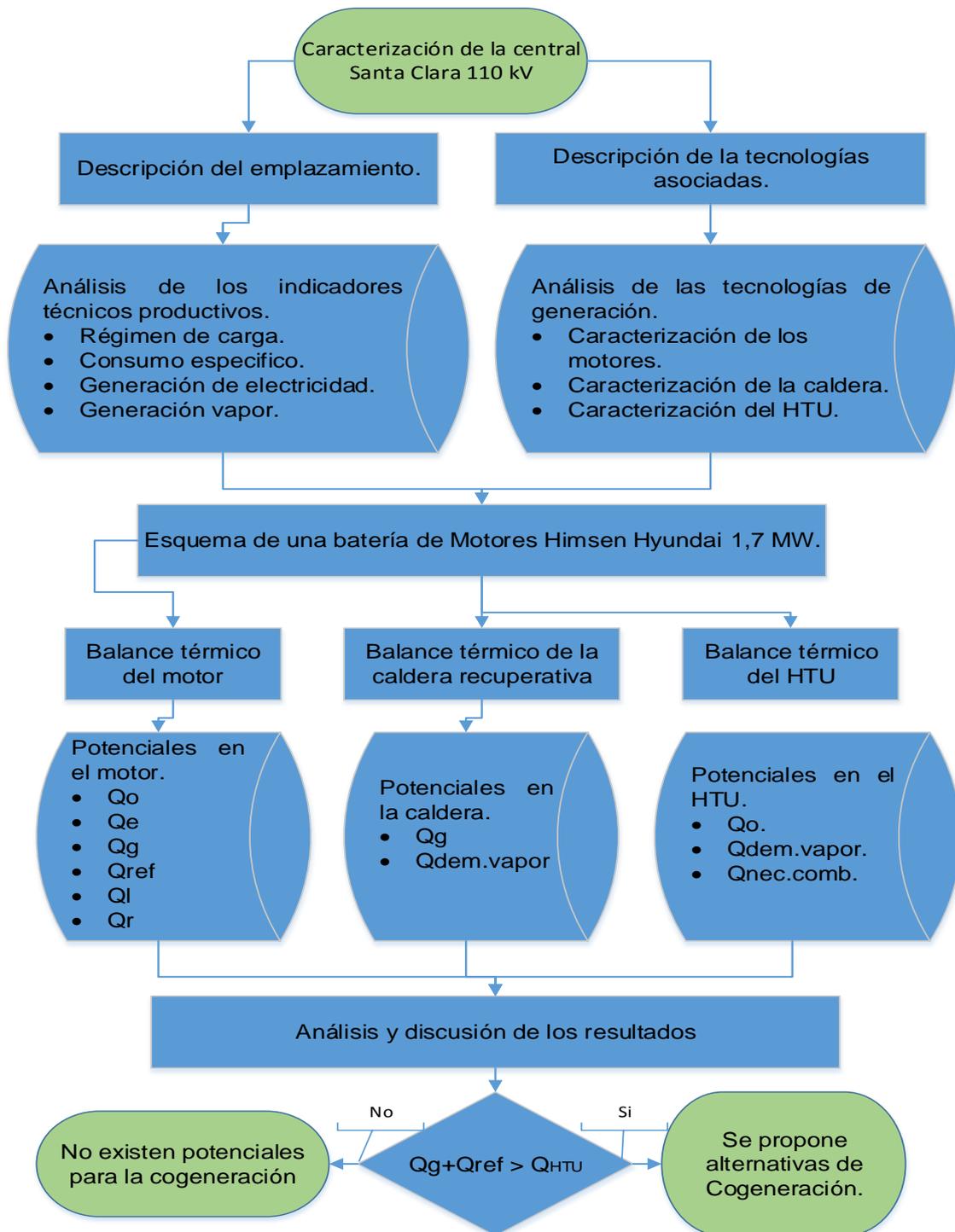


Figura 2: Metodología utilizada para determinar potenciales para la cogeneración en la central Santa Clara 110 kV.

2.1 Análisis del régimen de carga en la central eléctrica.

Para analizar el régimen de carga de la planta y los motores se estudiaron los datos registrados en el Historial de Control de Operadores que se lleva a cabo en la planta para constatar el comportamiento de dicha instalación durante el tiempo que se encuentra operando, prestando especial atención a la variación horaria del régimen de carga por motor, se encontró que funcionan generalmente a un factor de carga entre el 70 y 85 %.

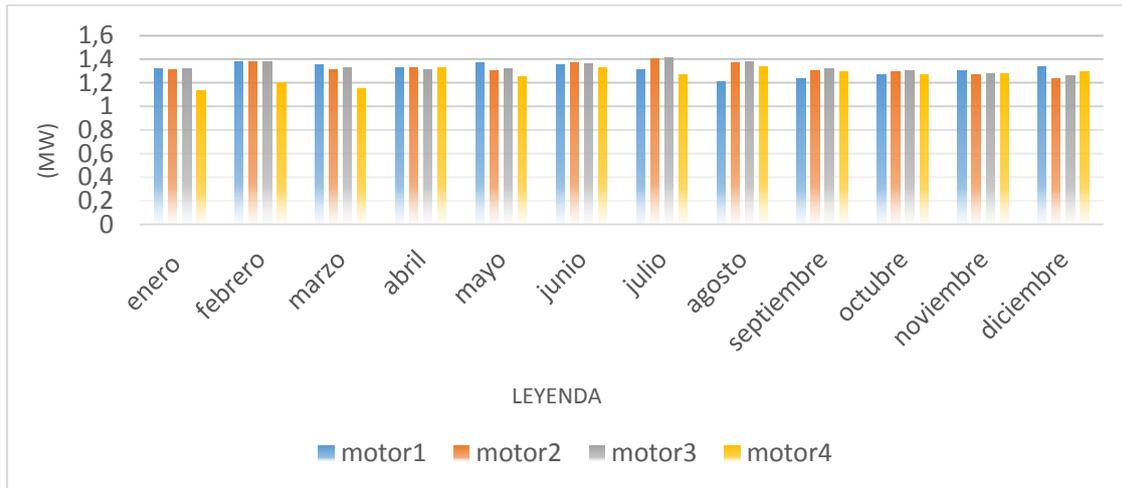


Figura 3: Representa el promedio de carga en la Batería 1 durante los meses del año 2016.

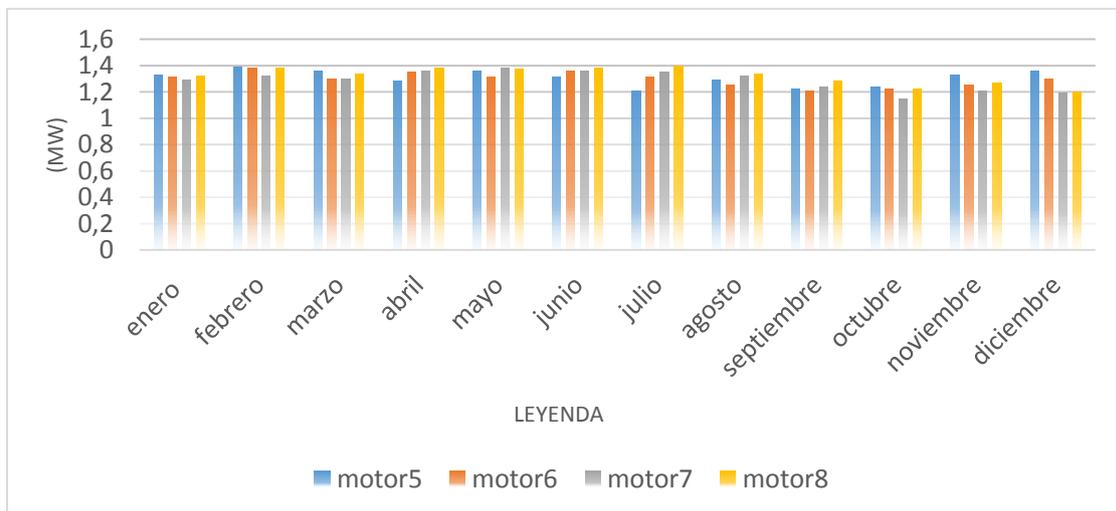


Figura 4: Representa el promedio de carga en la Batería 2 durante los meses del año 2016.

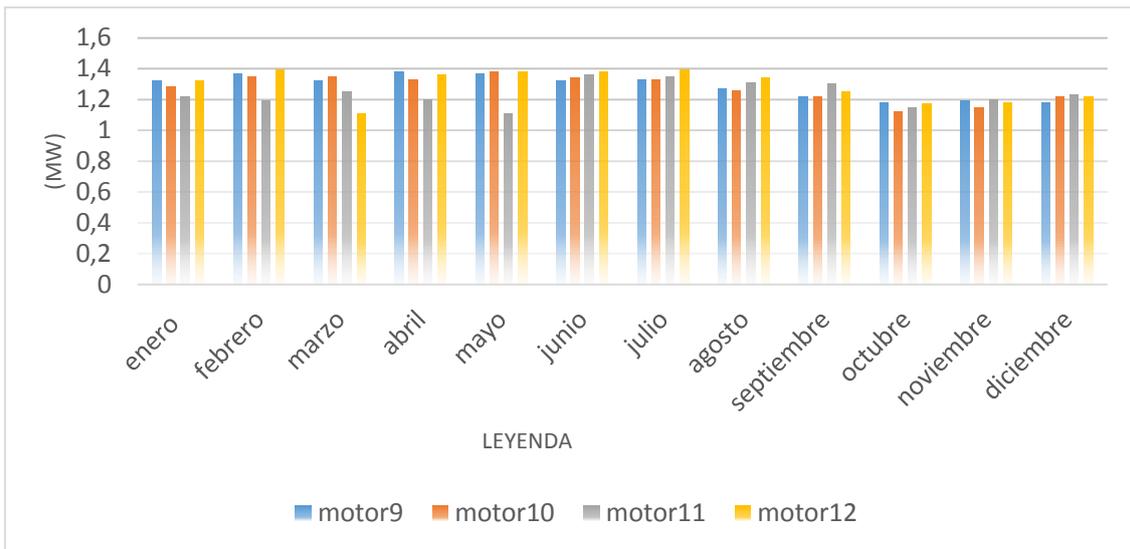


Figura 5: Representa el promedio de carga en la Batería 3 durante los meses del año 2016.

Las figuras 3, 4, 5 muestran la variación de los regímenes de carga registrados en el historial de operador, que dependen principalmente de la necesidad de generación eléctrica de la planta, porque el estado de carga en los motores es regulado según la necesidad y demanda del sistema eléctrico nacional, existen también variaciones que son debidas al mal funcionamiento de los motores ya que arriban a los 10 años de explotación y son expuestos a mantenimientos frecuentemente, aun así la diferencia de regímenes de carga entre los motores es compensada con horas de trabajo de los mismo, lo que implica que a veces para generar la electricidad planeada mensualmente es necesario aumentar las horas de trabajo de los motores.

Para el siguiente análisis se tiene en cuenta que cada motor representa una potencia instalada de 1,7 MW referente al 100% de su carga máxima de trabajo, el estudio del historial de control de operadores demostró que en planta durante el año 2016 los motores se encontraron trabajando bajo un régimen de carga nunca superior al 85 % lo que significa que no sobrepaso el orden de los 1,4 MW.

Tabla 5: Presenta el comportamiento del promedio de régimen de carga en los motores durante el año 2016.

Generación Himsen Hyundai	Promedio de Carga de trabajo anual (MW)	% de carga
Motor 1	1,31	77.05
Motor 2	1,32	77.64
Motor 3	1,33	78.23
Motor 4	1,26	74.11
Motor 5	1,31	77.05
Motor 6	1,30	76.47
Motor 7	1,29	75.88
Motor 8	1,32	77.64
Motor 9	1,29	75.88
Motor 10	1,28	75.29
Motor 11	1,24	72.94
Motor 12	1,29	75.88

2.2 Análisis de generación y consumo en planta.

De la revisión bibliográfica se obtuvo los parámetros típicos en una unidad de generación a base de motores de fuel oil, (Torres, 2010), lo que permite establecer comparaciones entre los valores típicos y los obtenidos durante el desarrollo del trabajo expresando un orden lógico a los resultados obtenidos lo que permitirá caracterizar la central Santa Clara 110 kV.

Tabla 6: Parámetros típicos de una unidad de generación.

Motor	Comb.	Consumo específico al factor de carga dado		Eficiencia (%)	Razón (kWhf/kWhe)	Factor de carga	Pot. (MW)
		(g/kWh)	(kg/h)				
Hyundai	Fuel Oil	210	303.4	40	2.52	0.85	1.7

Se tiene de la tabla 6 según el tipo de tecnología, sea Himsen Hyundai el motor, combustible fuel oil los consumos específicos al factor de carga dado y la razón de calor y electricidad que también se encuentra entre el rango establecido para este tipo de tecnología. Se tiene una eficiencia de 40 % lo que representa el aprovechamiento del combustible respecto a la electricidad generada y las potencia máxima prescrita para estos motores según (National

Electric Union, 2010), y el factor de carga que representa el estado de trabajo de los motores-generadores según la práctica.

2.3 Análisis de los indicadores técnicos productivos año 2016.

La situación crítica que afronta el país con los suministros de combustible ha provocado que se trabaje con bajas coberturas de combustibles en tanques, pero se busca soluciones para poder cumplir la demanda energética del país, como se demuestra a continuación representado gráficamente el cumplimiento de la generación es realmente superior al planificado con la excepción del mes de octubre donde es inferior aunque no afecta que el índice anual de dicha generación sobre cumpla lo planificado.

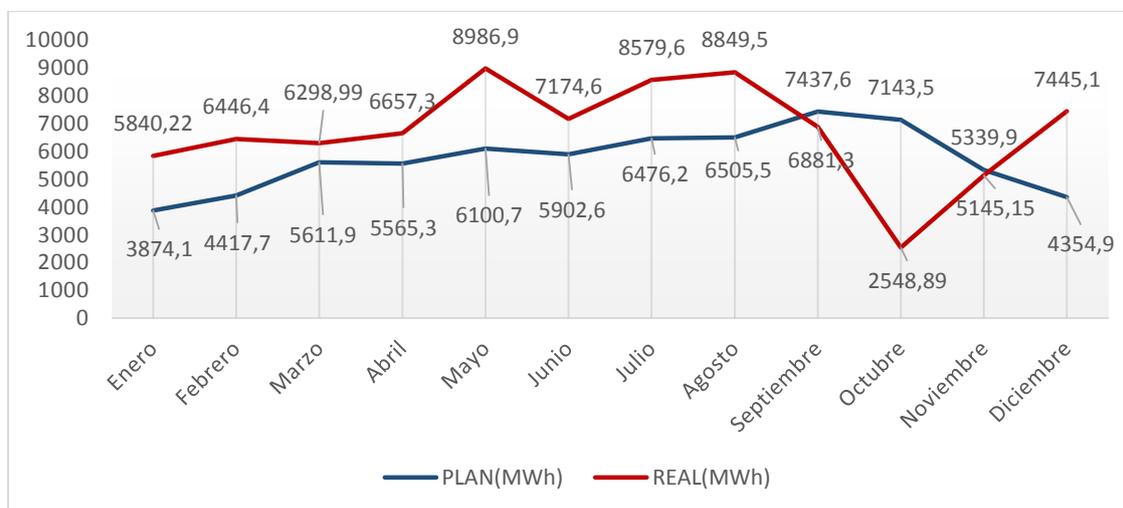


Figura 6: Cumplimiento de la Generación durante los meses del año 2016.

La figura 6 fue confeccionada a partir de los datos registrados en el historial de operadores representa la generación mensual de electricidad durante el año 2016, se pretende establecer una comparación entre la generación real y la planificada valor que permitirá caracterizar la central de acuerdo a su confiabilidad y compromiso con el sistema energético nacional.

2.4 Consumo de combustible

Para lograr este aumento en la generación y cumplir con la planificada fue necesario aumentar el tiempo de trabajo de los motores y por tanto paralelo a ello crece el consumo de combustible, fenómeno que se debe disminuir si se

requiere que dicha instalación sea viable para la generación de energía eléctrica con grupos electrógenos a base de fuel oil.

El consumo de combustible es un parámetro al cual se le presta especial interés, el deterioro del índice de consumo (relación entre el combustible por kWh generado) es un indicador del estado técnico de la tecnología y de lo adecuado o no que pueda ser el régimen de explotación.

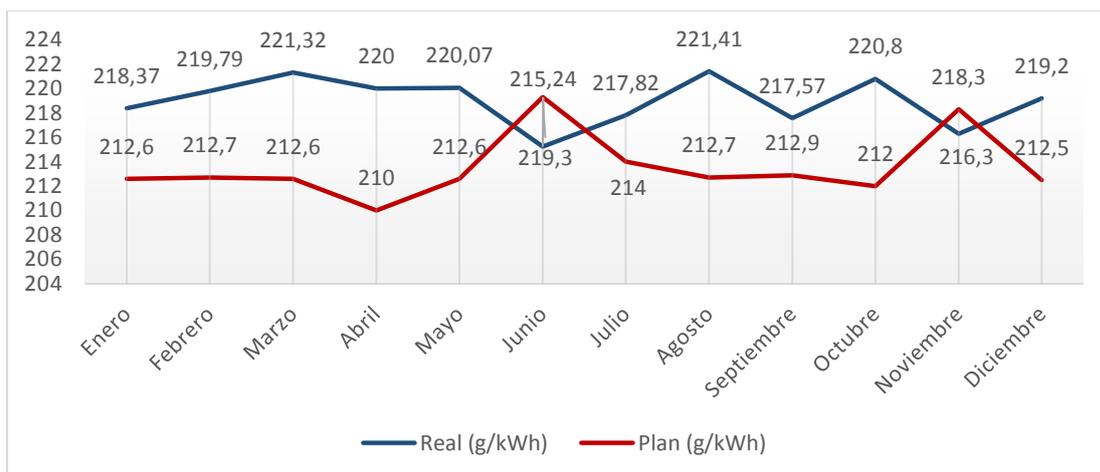


Figura 7: Muestra los índices de consumo planificados contra el real de la planta en el año 2016.

En el año 2016 como se muestra en la figura 7 se ha incumplido y no se logró en el transcurso del mismo revertir la situación, lo que es una tarea pendiente para el 2017.

2.5 Descripción de los problemas identificados en Planta que afectan principalmente los índices de consumo.

Se hace una descripción de los problemas identificados en la Planta que hoy persisten, se puede mencionar:

- 1- Purificadoras de fuel y aceite con problemas de multimonitores y sensores de velocidad.
 - El deterioro de las mismas y la falta de recursos para su puesta en marcha dentro de los cuales están los sensores de velocidad es una de las problemáticas que persisten en la actualidad e impiden el correcto mantenimiento al tener en estos momentos solo una purificadora por cada (HTU) unidad de tratamiento térmico de combustible.

- Durante los meses de marzo y abril se contó con el apoyo de especialistas y mecánicos de la central eléctrica Sagua 110, para en conjunto con el personal de la planta realizar el levantamiento, mantenimiento y recuperación de las purificadoras paralizadas, no concretando esta última acción por la falta de piezas descritas en patrimonio de la central eléctrica y los partes de equipos auxiliares.
- 2- Incorrecta selección de los discos de gravedad de las centrifugas de (FO) fuel oil.
- Las bajas coberturas de combustibles han impedido una sistematicidad en la correcta selección de los discos de gravedad.
- 3- Sedimentación en los tanques de servicio de DO.
- Esta es una de las causas principales del deterioro de los sistemas de inyección fundamentalmente de las bombas. La sedimentación de los tanques de diésel en los (HTU) es originada por la contaminación con fuel devenido de problemas en las válvulas de cambio de combustible de los motores durante años, en el 2016 se realizó una limpieza a uno de estos tanques en el (HTU-2), en el presente año tenemos la planificado la ejecución de los restantes y la reparación de todas las válvulas de combustible para evitar este problema.
- 4- Desgaste del sellaje de las válvulas de cambio de combustible y aceite.
- Destacar que la reparación de estas válvulas no se ha realizado con efectividad por no contar con los kits de mantenimiento. Este año están planificadas en los mantenimientos capitales.
- 5- No se realiza la rotación de equipos auxiliares.
- En el 2016 se comenzó la recuperación y enrollado de motores eléctricos como parte del programa de recuperación de equipos auxiliares, importante destacar la sustitución de las bombas de circulación de las calderas (ITUR) por bombas (KTB), la puesta en marcha de 3 bombas nuevas de alimentar, el completamiento de todos los ventiladores de los radiadores enrollando los quemados y sustitución por nuevos, se nos entregaron 3 ventiladores de tiro inducido nuevos. El plan de la recuperación de la disponibilidad para el 2017 tiene

contemplado los equipos auxiliares, el completamiento de las piezas y la sustitución de algunos casos.

6- Producción de lodo.

- Debido al tiempo de explotación de la planta, existe una acumulación alta de desechos sólidos en los tanques de lodo de las unidades de tratamiento térmico (HTU), esto provoca el incumplimiento de la Instrucción UJ IG 0408 no lográndose el drenaje de los tanques como se establece y creando capas debido al almacenamiento de lodo, a medida que aumenta los niveles, estas se agudizan y el drenaje se hace obligatorio realizarlo por la descarga a la zanja del descargadero seguido al foso oleaginoso. Cuando se realiza la suma de las extracciones con la existencia del tanque se corresponde con la cantidad de lodo producido según página de (GEDECU) esto se evidencia en el Control de Operadores de la central, esto ha sido objeto de consulta por los especialistas de la planta y la (UEB). Se hace necesario para el año 2017 realizar una limpieza a fondo del tanque de lodo para lograr eliminar los sedimentos que impiden el correcto drenaje del mismo, y la terminación del calentador pendiente desde el montaje.

7- Alto consumo y salideros de vapor y agua tratada.

- El deterioro del sistema de producción y transporte de vapor se encuentra en un estado crítico sumado a las condiciones que presenta la unidad de tratamiento químico de agua con las tuberías y accesorios, el consumo de agua se eleva y se hace necesario un mantenimiento especializado urgente para evitar males mayores. En los informes químicos que se elaboran en la planta todos los meses se reflejan todos los problemas que presentan en esta área.

8- Insulación de Múltiples de Escape.

- Punto no menos importante por su repercusión en las temperaturas dentro del contenedor y el aire de admisión. En el 2015 se realizaron las insulaciones de 100% de los motores.

9- Existen motores trabajando limitados.

- Este acápite reflejado en el Plan de Medidas de la planta Santa Clara 110 kV y al cual tributan todos los demás representa la principal fuente de deterioro del índice de consumo de combustible, la central el año

2015, trabajo por este concepto al 74% como promedio de carga. Estudios realizados por especialistas de (INEL) en los meses de julio lo demuestran.

A finales de 2016 especialistas de Pentol realizaron mediciones en la central eléctrica las que demuestran el deterioro en la combustión, factor que según ellos mantiene el mismo comportamiento en todo el país debido a las bajas coberturas de combustible.

2.6 Metodología para el balance térmico de los motores Himsen Hyundai de potencia 1,7 MW en la generación distribuida.

La metodología implementada para llevar a cabo el análisis térmico del motor de combustión interna Himsen Hyundai según el (Jóvaj 1987), el autor prescribe una análisis y balance térmico de los motores de combustión interna ciclo Otto, el caso estudiado refiere al correspondido con las características del modelo Himsen Hyundai antes expuesto donde se tiene que para este motor con sobrealimentación las componentes del balance térmico se determinan mediante la ecuación.

$$Q_o = Q_e + Q_{ref} + Q_g + Q_c + Q_l + Q_r \quad (1)$$

Donde:

- Q_o , es la cantidad total de calor introducida con el combustible al motor en el régimen dado.
- Q_e , el calor equivale al trabajo efectivo del motor.
- Q_{ref} el calor cedido al medio refrigerante.
- Q_g , el calor que se lleva al motor los gases de escape.
- Q_c , la parte del calor del combustible que se pierde debido a su combustión incompleta.
- Q_l , el calor entregado al lubricante.
- Q_r , el término independiente que determina las pérdidas no incluidas en las demás componentes del balance térmico.

La cantidad total del calor consumida en 1s sea Q_o se halla por la expresión:

$$Q_o = H_u G_c \quad (2)$$

Donde:

- G_c , es el consumo de combustible al factor de carga dado en kg/s.
- H_u , poder calórico del fuel oil en kJ/kg

Consumo específico horario al factor de carga dado (kg/h), es el resultado de multiplicar; Régimen de carga promedio (MW), Factor de carga (%) y consumo específico de combustible a ese régimen de carga (g/kWh).

$$G_c = \frac{\text{Pot} * F_c * C_c}{1000} \quad (3)$$

Donde:

- Pot, unidad de potencia instalada(MW).
- F_c , factor de carga dado (%).
- C_c , consumo específico de combustible al factor de carga dado (g/kWh).

El calor (en kJ/s) equivale a la potencia efectiva (en kW) de lo que se tiene:

$$Q_e = N_e * E_{fm}$$

Donde:

- E_{fm} , eficiencia mecánica del generador; se asume 98%.

El calor transmitido al medio refrigerante a través de las paredes del cilindro, culata, pistón y de sus segmentos puede determinarse requiriendo a la ecuación:

$$Q_{ref} = G_{ref} c_{ref} (t_{sal} - t_{ent}) \quad (4)$$

Donde:

- Agente refrigerante es el agua.
- G_{ref} es la cantidad de agente refrigerante que pasa por el motor en kg/s.
- c_{ref} el calor específico del refrigerante.
- T_{sal} la temperatura del agente refrigerante de la salida del motor en °C.
- T_{ent} lo mismo pero a la entrada del motor en °C.

El calor que arrastran los gases de escape es:

$$Q_g = G_c [M_2 (\mu_c'') T_g - M_1 (\mu_{cp}) T_0] \quad (5)$$

Donde:

- Q_g [$M_2 (\mu c'') T_g$] es la cantidad de calor evacuado del cilindro con los gases de escape, en kJ/s.
- $M_1 (\mu c_p) T_0$, la cantidad de calor introducida al cilindro del motor con la carga fresca, kJ/s.
- $\mu c''$ y μc_p son los calores específicos molares a presión constante respectivamente de los productos de combustión y de la carga fresca en $J/kmol \cdot ^\circ C$.

La ecuación anterior puede expresarse también de la forma:

$$Q_g = \dot{m}_g * C_{p_{gases}}(T_{sal} - T_{ent})_{gases} \quad (6)$$

Donde:

- \dot{m}_g , flujo de gases.
- $C_{p_{gases}}$, calor específico de los gases de escape producto la combustión.
- T_{sal} , temperatura de salida de los gases del motor.
- T_{ent} , temperatura de entrada del combustible al motor.

Las propiedades de los gases de escape producto de la combustión se tienen de (National Electric Union 2010), así como el valor de Masa de gases (kg gases/kg comb.) que fue determinado por medio de un balance estequiométrico del combustible fuel oil. (Moya, Diciembre de 2011)

El calor Q_1 se determina midiendo la cantidad de calor cedida por lubricante al agua en enfriamiento de aceite.

Cálculo del calor cedido por el lubricante al agua en enfriamiento de aceite.

$$Q_1 = \dot{m}_a * C_p(T_{sal_{aceite}} - T_{ent_{agua}}) \quad (7)$$

Donde:

- \dot{m}_a , flujo de agua de enfriamiento de aceite.
- C_p , calor específico del agua de enfriamiento.
- $T_{sal_{aceite}}$ temperatura del aceite a la salida del intercambiador de calor.
- $T_{ent_{agua}}$ temperatura del agua a la entrada del intercambiador de calor.

El valor de Q_c , la parte del calor del combustible que se pierde debido a su combustión incompleta cuando $\alpha \geq 1$ generalmente no se calcula aisladamente, sino que se incluye en el término Q_r que se puede calcular por la diferencia:

$$Q_r = Q_o - (Q_e + Q_{ref} + Q_g + Q_1) \quad (8)$$

Del balance térmico del motor se obtienen los potenciales de calor que fluyen en el proceso de generación de electricidad con grupos electrógenos, el aprovechamiento de estos potenciales térmicos en la central promueve aumentar la eficiencia y rendimiento del ciclo de generación, como se estableció anteriormente de las propiedades del fuel oil su alto grado de viscosidad requiere que sea precalentado, dicho proceso transcurre en la unidad de tratamiento del combustible donde se eleva la temperatura del fuel oil con la energía térmica entregada por el vapor de agua que se generó en la caldera. En la instalación existen operantes 3 calderas recuperativas que aprovechan el calor residual que arrastran los gases de escape del motor para obtener vapor de agua de 120 a 150°C, para determinar que parte del calor que arrastran los gases de escape es aprovechada en la caldera y que potencial residual queda a la salida de la chimenea es necesario realizar el balance térmico de dicha caldera recuperativa.

2.7 Procedimiento para el balance térmico de las calderas recuperativas en la generación distribuida.

La Central en su proceso de generación eléctrica utiliza un ciclo combinado mediante el aprovechamiento del calor de los gases de escape de los motores en tres calderas recuperativas para el precalentamiento del fuel oil, quedando calor residual aprovechable con temperaturas por encima de los 240°C, aunque existen otras fuentes que pueden ser valoradas también. (GDECU)(Luís Manuel García Rojas) (Flórez Orrego, 2013)

La siguiente tabla es obtenida mediante el manual de operadores de motor Himsen Hyundai 1,7MW, en ella se reflejan los parámetros correspondientes al ciclo térmico en la caldera recuperativa.

Tabla 7: Parámetros en la caldera recuperativa.

Caldera recuperativa		
Nivel del tanque alimentación caldera	mm	320 - 340
Temp. Agua alimentar la caldera	°C	60 - 70
Presión cabezal retorno condesado	bar	0 - 0.1
Presión de succión bomba alimentar caldera	bar	10 - 12
Presión succión bomba circulación caldera	bar	7 - 7.5
Presión descarga bomba circulación caldera	bar	10 - 11
Nivel del domo	mm	280 - 300
Temp. Entrada de los gases caldera	°C	280 - 350
Temp. Salida de los gases de la caldera	°C	151 - 250
Apertura Dámper de la caldera	%	0 - 85
Presión Domo caldera	bar	50 - 100
Presión cabezal vapor caldera	bar	6.8 - 7.2
Presión de aire baja presión en caldera	bar	3 - 4
Presión agua tratada en caldera	bar	3 - 3.5

Para analizar el comportamiento térmico del agua en las calderas se fijó una temperatura de entrada del agua 60°C y salida de vapor de agua a 150°C, con la ayuda de la tabla 7 parámetros en la caldera, de las propiedades del agua por medio de la temperatura y la presión 3 bar (abs), así como el consumo horario de agua sea 137,05(kg/h), se establecen los valores mostrados a continuación.

Tabla 8: Propiedades del agua para diferentes temperaturas.

Agua		Vapor de agua
Temperatura (°C)	60	150
Entalpía (kJ/kg)	251.39	2752.7
Entropía (kJ/kg)	0.831	6.9287
Cp., (kJ/kgk)	4.1823	2.2767
Volumen(m^3/kg)	0.00102	0.469
Energía interna(kJ/kg)	251.08	2564.3

Por medio del análisis térmico y propiedades del fluido (agua), según los estudios prescritos por (A.Boles , Management 2008, PIEDRAHITA 2009, Gonzales 2015) se procede a determinar el calor que demanda la generación de vapor por medio de la siguiente expresión:

$$Q.\text{dem}_{\text{vapor}} = (h_{\text{sal}} - h_{\text{ent}})\dot{m}_a \quad (9)$$

Donde:

- h_{sal} es la entalpia del agua a la temperatura de salida.
- h_{ent} es la entalpia del agua a la temperatura de entrada.
- \dot{m}_a el flujo de agua en Kg/s.

Cálculo de calor cedido al combustible por el vapor:

$$Q.\text{nec}_{\text{comb}} = \dot{m}C_p(T_{\text{sal}} - T_{\text{ent}}) \quad (10)$$

Donde:

- T_{sal} es la temperatura de salida del combustible, del intercambiador de calor.
- T_{ent} es la temperatura de entrada del vapor de agua al intercambiador de calor.
- C_p es el calor específico del combustible fuel oil.
- \dot{m} flujo de vapor de agua a través del intercambiador de calor.

Para determinar la eficiencia en el intercambiador de calor se parte de análisis térmico previo del combustible fuel oil.

Eficiencia en el intercambiador de calor:

$$e = \frac{Q.\text{dem}_{\text{vapor}} - Q.\text{nec}_{\text{comb}}}{Q.\text{dem}_{\text{vapor}}} \quad (11)$$

En la central objeto de estudio Santa Clara 110 kV el potencial térmico que se halla en los gases de escape se utiliza mediante una caldera recuperativa con la finalidad de generar vapor para los procesos de tratamiento de combustible. Consta además aclarar que el análisis referente a estos valores se hizo solo para un motor de los 12 con que cuenta la central, a continuación se procede a

realizar el balance térmico de la caldera recuperativa con la peculiaridad de que esta es común para 4 motores formando en conjunto una batería, entonces el potencial teórico que representan los gases de escape del motor se afectará por 4 (Unidades MTU que componen la batería), facilitando el análisis en la caldera recuperativa.

Tabla 9: Propiedades de los gases de escape del motor.

Gases de escape	
Temp. Gases a la salida (°C)	450 - 520
Temp. Carga fresca de entrada del motor (°C)	110 - 149
Masa de gases (kg gases/kg comb.)	36,14
$C_{p_{gases}}$ (kJ/kgk)	1,015
\dot{m}_g (kg/s)	2.85

Las propiedades de los gases de escape producto de la combustión se tienen del manual de operación de los motores, así como el valor de Masa de gases (kg gases/kg comb.) que fue determinado por medio de un balance estequiométrico del combustible fuel oil. Para determinar el potencial térmico que arrastran los gases de escape producto de la combustión a la salida de la caldera, se plantea el siguiente análisis.

Cálculo del calor cedido por los gases en la caldera:

$$Q_c = \dot{m}_g * C_p(T_{sal} - T_{ent}) \quad (12)$$

Donde:

- T_{sal} temperatura de los gases a la salida de la caldera.
- T_{ent} temperatura de los gases a la entrada de la caldera.
- C_p calor específico de los gases a la temperatura de entrada a la caldera.
- \dot{m}_g flujo de gases a la entrada de la caldera.

El potencial residual de calor que se rechaza a través de la chimenea será:

Cálculo del Calor neto:

$$Q_{neto} = Q_g - Q_c \quad (13)$$

Donde:

- Q_g , calor que arrastran los gases de escape producto de la combustión a la entrada de la caldera recuperativa.
- Q_c , calor cedido al agua en la caldera por los gases de escape.

Cálculo de eficiencia en el intercambiador de calor de los gases:

$$e_{\text{gases}} = \frac{Q_g - Q_c}{Q_c} \quad (14)$$

2.8 Procedimiento para el balance exergético.

Según (Kotas 1995), la exergía es una medida universal del trabajo potencial o de la calidad de las diferentes formas de energía respecto a un ambiente dado. La pérdida exergética proporciona una medida cuantitativa, generalmente aplicable, del proceso o la ineficacia de un sistema. Por lo que el análisis exergético se ajusta bien para el análisis de las ineficacias de una unidad, proceso o planta total. En otras investigaciones se plantea que la exergía es la cantidad de trabajo que puede ser extraído por un consumidor de energía externo durante una interacción reversible entre el sistema y sus alrededores hasta que un completo equilibrio es alcanzado. La exergía depende de los estados relativos de un sistema y sus alrededores, al ser definidos por cualquier conjunto relevante de parámetros. Bajo completo equilibrio, la exergía es cero. Además la exergía se encuentra sujeta a la ley de conservación solamente en procesos reversibles; en todos los otros casos puede desaparecer parcial o completamente como resultado de la disipación de energía, la cual es consecuencia de irreversibilidades. Entre las irreversibilidades que pueden presentarse en un proceso se encuentran: fricción, libre expansión, mezcla de dos gases, transferencias de calor a través de diferencias finitas de temperaturas, resistencias eléctricas, deformaciones inelásticas de sólidos y reacciones químicas, con lo que se demuestra que es casi imposible la eliminación de éstas, sólo es posible su minimización en el proceso.

Por otra parte está definido que la exergía de un portador de energía es una propiedad termodinámica que depende del estado del portador considerado y el estado del medio o estado de referencia, como también se le conoce. El

concepto de exergía resulta ser muy cómodo para analizar el grado de perfeccionamiento termodinámico de cualquier aparato térmico y tiene la ventaja de poder aplicarse a procesos químicos, de combustión, bioquímicos, físicos, etc.

Dado que la exergía es la parte de la energía transformable en trabajo útil, se puede plantear que la energía mecánica y la eléctrica son totalmente exergía, puesto que no existen limitaciones teóricas para su transformación total en trabajo útil. Sin embargo, la energía térmica sólo es transformable en trabajo útil con un rendimiento limitado, que depende, fundamentalmente de las temperaturas del foco caliente y del ambiente, siendo, en la mayoría de los casos, más interesante conocer la exergía disponible que la energía. Para la realización del balance exergético del proceso de generación de electricidad en los grupos electrógenos este trabajo se basa en la metodología propuestas por autores como (A.Boles , M. J. Moran , Agudelo 2006, Management 2008) donde se prescribe que al motor entran flujos de aire y combustible y de él salen el flujo de gases de escape y los flujo de gases de escape y los flujos energéticos de trabajo efectivo, calor de refrigeración y perdidas al ambiente. Las pérdidas al ambiente se incluyen en las irreversibilidades, ya que esta energía se degrada en el ambiente por lo que la ecuación que definirá el balance exergético será:

$$\dot{Ex}_{comb} = \dot{Ex}_W + \dot{Ex}_g + \dot{Ex}_{ref} + \dot{Ex}_D \quad (15)$$

Donde la exergía del combustible \dot{Ex}_{comb} , se determina por la expresión:

$$\dot{Ex}_{comb} = \dot{m}_{comb} ex_{comb}^Q \quad (16)$$

Para:

- \dot{m}_{comb} , flujo de combustible de alimentación del motor.
- ex_{comb}^Q , exergía química del combustible.

Según (Kotas 1995) la exergía química del combustible se determina a partir de su poder calórico, para el desarrollo de este trabajo solo se analizara la exergía de los gases de escape y el agua de refrigeración debido a que en ellos se encuentra el mayor potencial identificado en la planta.

El flujo exergético del trabajo es la misma potencia efectiva. Para calcular el flujo exergético de la corriente de gases de escape se considera solo la parte física de su exergía, ya que la química no se puede aprovechar con dispositivos convencionales o sistemas de cogeneración. (Agudelo 2006, Özkan 2015)

$$\dot{E}x_g = \dot{m}_g ex_g^F = \dot{m}_g [(h - h_0)_g - T_0(s - s_0)_g] \quad (18)$$

Para:

- \dot{m}_g , flujo de gases de escape [kg/s].
- $(h - h_0)_g$, la diferencia de entalpía a temperaturas de entrada de los gases a la caldera y el medio circundante respectivamente [kJ/kg].
- T_0 , temperatura del medio circundante [°C].
- $(s - s_0)_g$, diferencia de entropía a temperaturas de entrada de los gases a la caldera y el medio circundante respectivamente [kJ/kg].

La exergía de la corriente de agua $\dot{E}x_{ref}$, a la que se cede el calor de refrigeración es:

$$\dot{E}x_{ref} = \dot{m}_{agua} ex_{agua}^F \quad (19)$$

$$\dot{E}x_{ref} = \dot{m}_{agua} [(h - h_0)_{agua} - T_0(s - s_0)_{agua}] \quad (19.1)$$

Para:

- \dot{m}_{agua} , flujo de agua de refrigeración.
- ex_{agua}^F , exergía física del agua.

Existen varias posibilidades de definir la eficiencia de segunda ley según (Flórez Orrego 2013) en este trabajo se calculara como cociente entre la potencia real y la máxima reversible.

$$\eta_{II} = \frac{\dot{W}_{real}}{\dot{W}_{m\acute{a}x}^{rev}} \quad (20)$$

2.3 Cálculo y fundamentos de los análisis propuestos.

Los resultados obtenidos en el presente trabajo son presentados por el software EES (Engineering Equation Solver)(Klein 1992 - 2012), para ello fue necesario formular las metodologías anteriores de manera que en función de la variación de parámetros se pueda evaluar el comportamiento de las demás variables. Como se identificó los regímenes de carga más probables en la planta fueron fijados los mismos apreciando el comportamiento de la batería de motores Himsen Hyundai en cuanto a la variación de los potenciales térmicos, de manera similar se realizó el mismo análisis para el balance térmico en la caldera, pero el valor fijado fue el potencial térmico que representan los gases de escape y la variación de la generación de vapor es el resultado obtenido.

Capítulo III: Análisis y discusión de los resultados.

3.1 Resumen del régimen de carga del 2016.

Para la realización de los histogramas fue necesario efectuar una recopilación de datos sobre el control de la demanda horaria desde la hora 1 del mes de enero hasta la hora 24 del mes de diciembre lo que facilitó mostrar las variaciones en cuanto al por ciento de carga más frecuente para estos motores. Este trabajo tiene como bases una gran manipulación de datos para llegar a la obtención de estos gráficos. (Control de operadores 2015,2016).

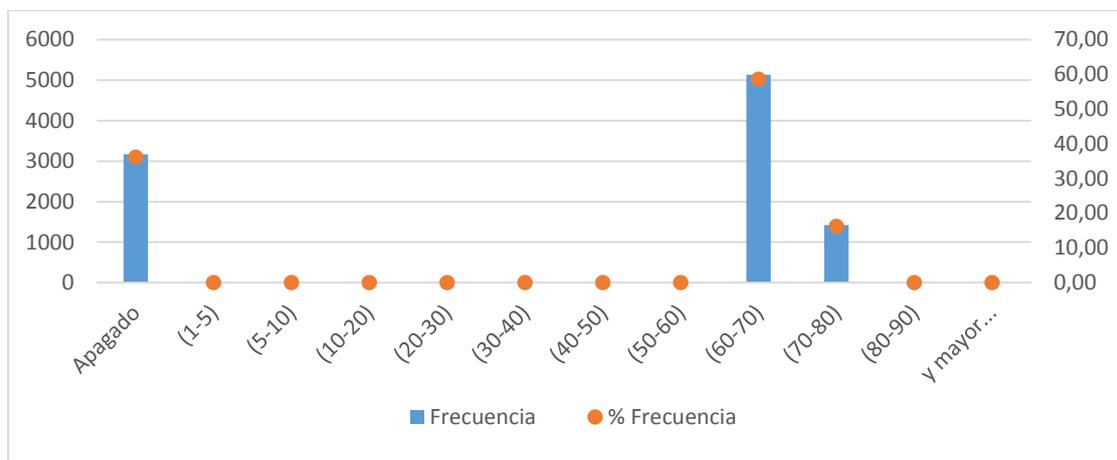


Figura 8: Histograma de frecuencia del motor 1.

De la figura 8 se aprecia que durante el año 2016 el motor 1 se encontró apagado sobre las 3000 horas y operando a un régimen de carga entre el 60 y 70 %, 4800 horas de igual manera entre el 70 y 80 % solo 1100 horas.

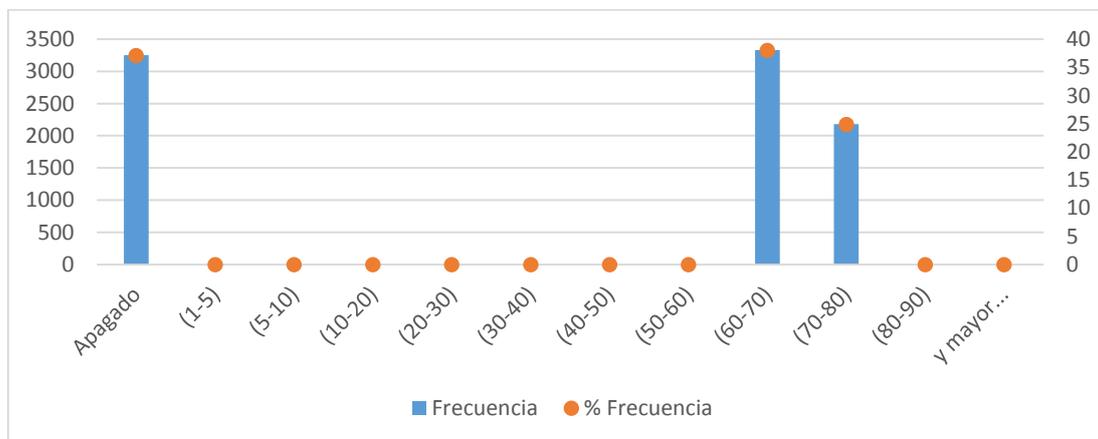


Figura 9: Histograma de frecuencia del motor 2.

En la figura 9 se aprecia que el motor 2 se encontró apagado sobre las 3300 horas y operando a un régimen de carga entre el 60 y 70 %, 3400 horas de igual manera entre el 70 y 80 % solo 2000 horas.

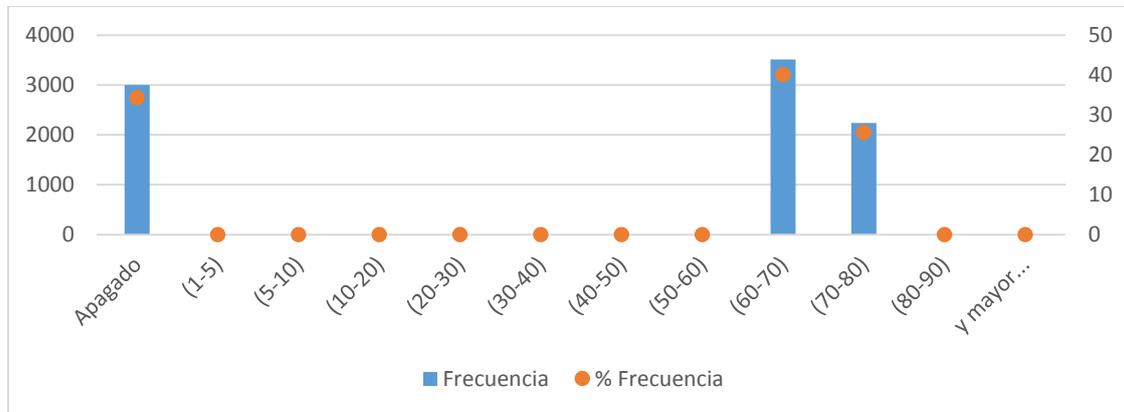


Figura 10: Histograma de frecuencia del motor 3.

De la figura 10 se aprecia que los motores 2 y 3 presentan registros similares de carga y tiempo en horas de trabajo.

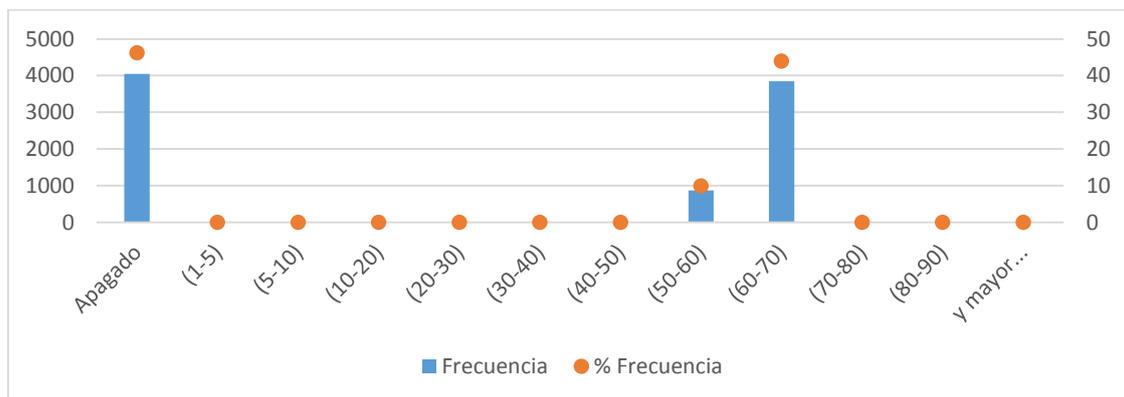


Figura 11: Histograma de frecuencia del motor 4.

Las figuras 8, 9, 10, 11, representan el registro de carga por horas de trabajo de los motores correspondientes a la batería 1, donde se aprecia que el motor 1 y 3 se encuentra operantes la mayor parte del tiempo bajo un régimen de carga entre el 60 y 80 %, mientras que los motores 2 y 4 presentan los registros más bajos de carga, así como se encontraron apagados la mayor parte del tiempo. Según el director de la central Santa Clara 110 kV, (Manuel Alejandro), el motor 4 presenta tan bajos registros de carga porque estuvo de mantenimiento durante largos periodos, también afirmo que el motor 3 se encuentra en buen estado técnico debido que sus mantenimientos han sido progresivos y de corto plazo no afectando su estado de carga y el tiempo planificado de trabajo.

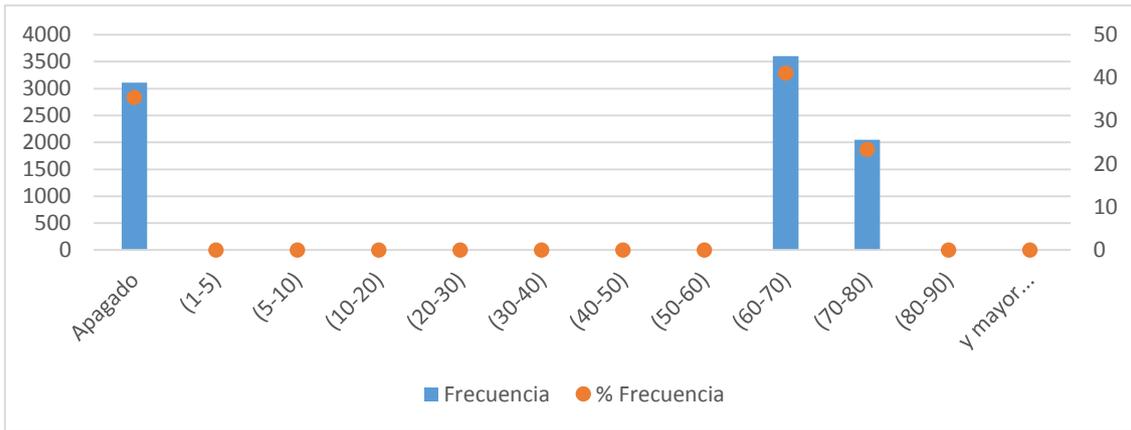


Figura 12: Histograma de frecuencia del motor 5.

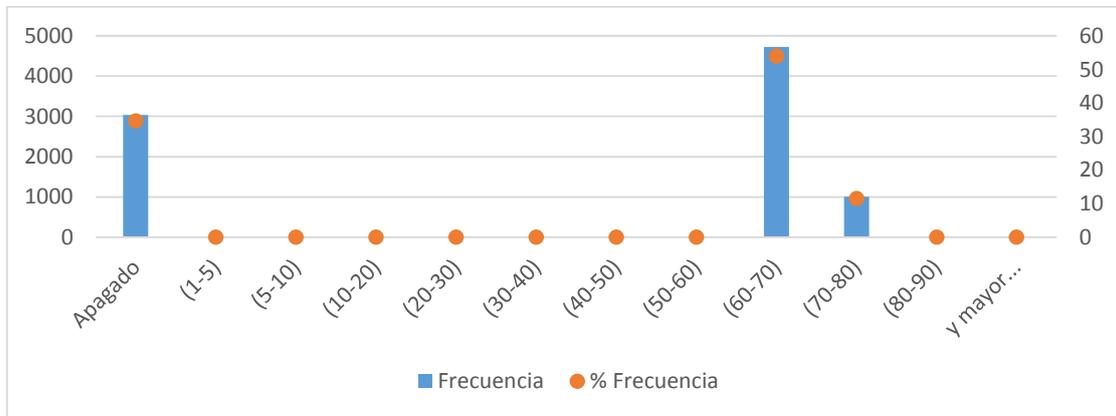


Figura 13: Histograma de frecuencia del motor 6.

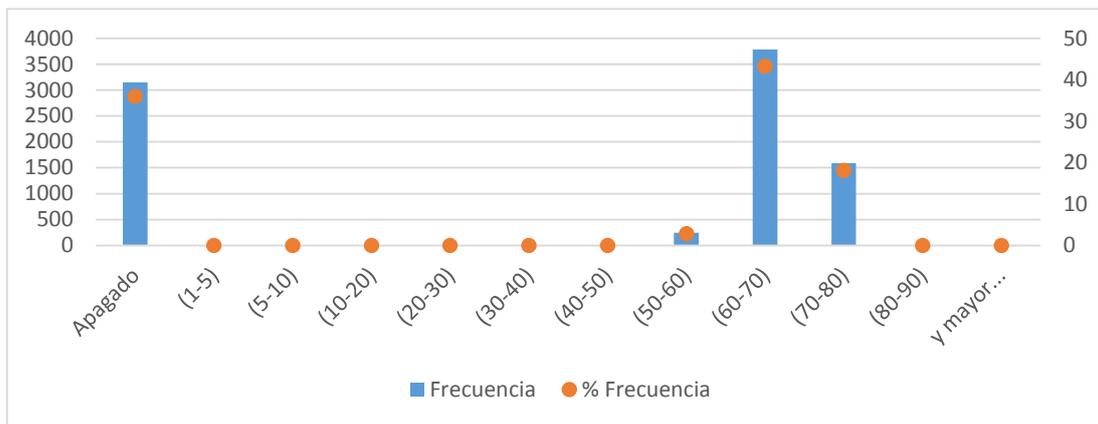


Figura 14: Histograma de frecuencia del motor 7.

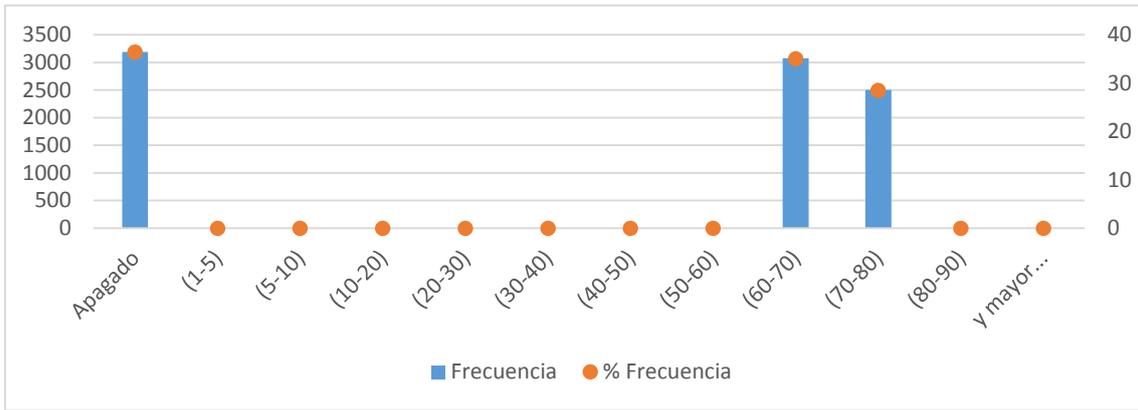


Figura 15: Histograma de frecuencia del motor 8.

Las figuras 12, 13, 14, 15 representan los histogramas de frecuencia en horas de trabajo de los motores que componen la batería 2, para diferentes registros de carga, donde se aprecia que todos se encontraron operando la mayoría del tiempo, aunque el motor 7 presenta una variación del estado de carga entre 50 y 80 %, siendo el más bajo registrado para esta batería.

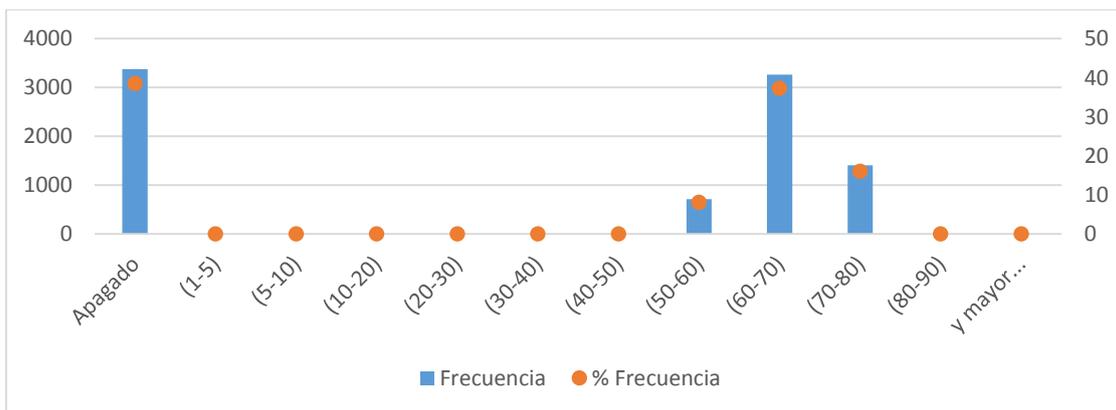


Figura 16: Histograma de frecuencia del motor 9.

Del análisis correspondiente a la batería 3, se aprecia mediante las figuras 16,17, 18, 19, que la batería opera con el menor régimen de carga en la planta, que se encontraron apagados los motores la mayor parte del tiempo, lo que corresponde a diferentes situaciones tales como; el motor 11 se mantuvo bajo reparaciones por periodos prolongados. Cabe destacar que la planta cumple con la demanda energética nacional y durante el año 2016 se logró sobre cumplir el plan de generación eléctrica.

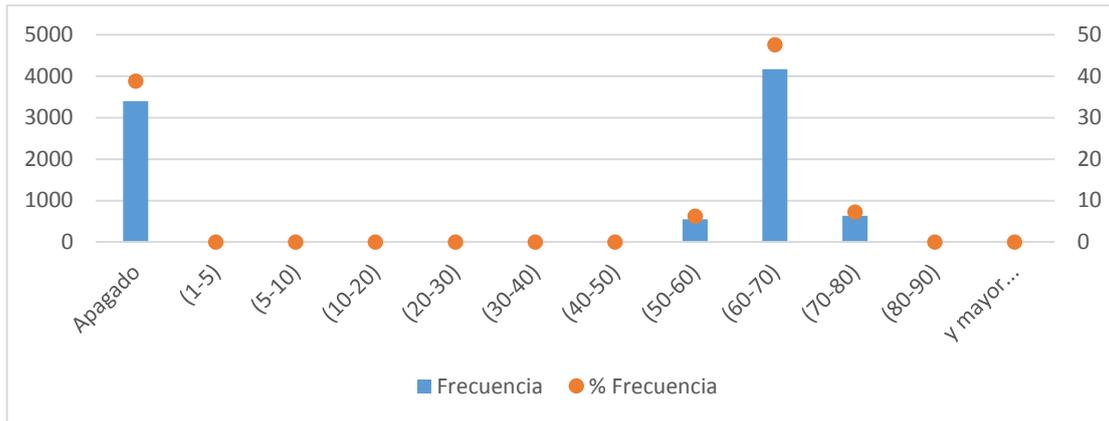


Figura 17: Histograma de frecuencia del motor 10.

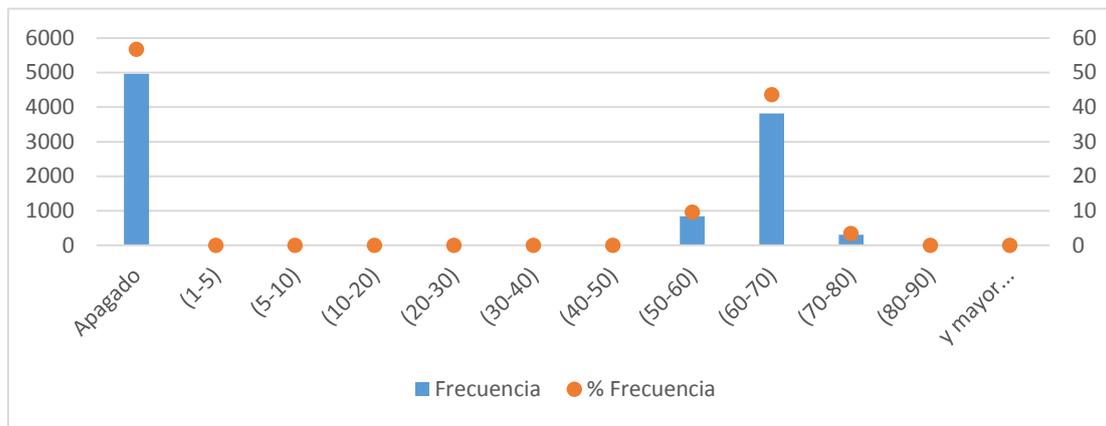


Figura 18: Histograma de frecuencia del motor 11.

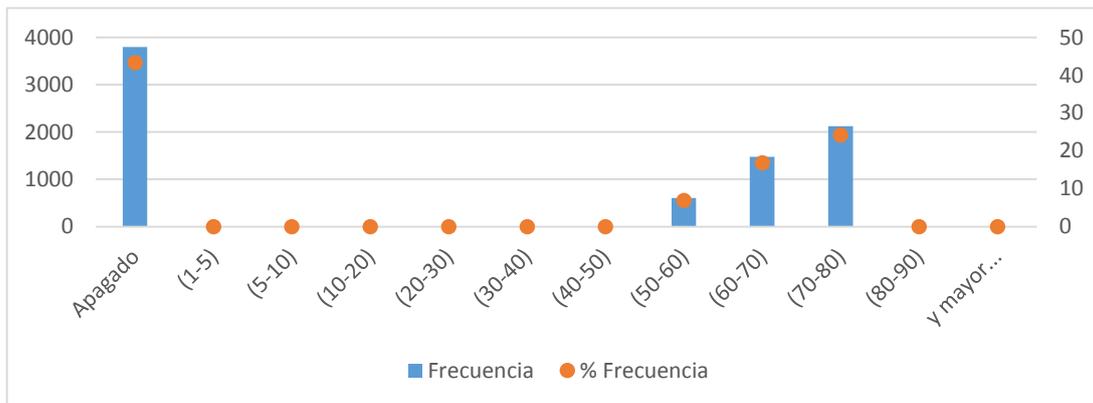


Figura 19: Histograma de frecuencia del motor 12.

Se identifica que en la central Santa Clara 110 kV las unidades de generación (MTU) Himsen Hyundai se encuentran operantes la mayor parte del tiempo, el régimen de carga más probable identificado en planta se halla en el intervalo (70-80%), valor sobre el cual se fijarán los parámetros para el análisis térmico del motor y la caldera, así como para determinar las emisiones contaminantes en la central.

3.2 Generación anual de electricidad.

Se determinó la generación anual de electricidad en la central Santa Clara 110 kV, destacando el cumplimiento de la misma respecto a la planificada, producto del aumento en tiempo de trabajo de los motores, sin variar los regímenes de carga más probables identificados anteriormente.

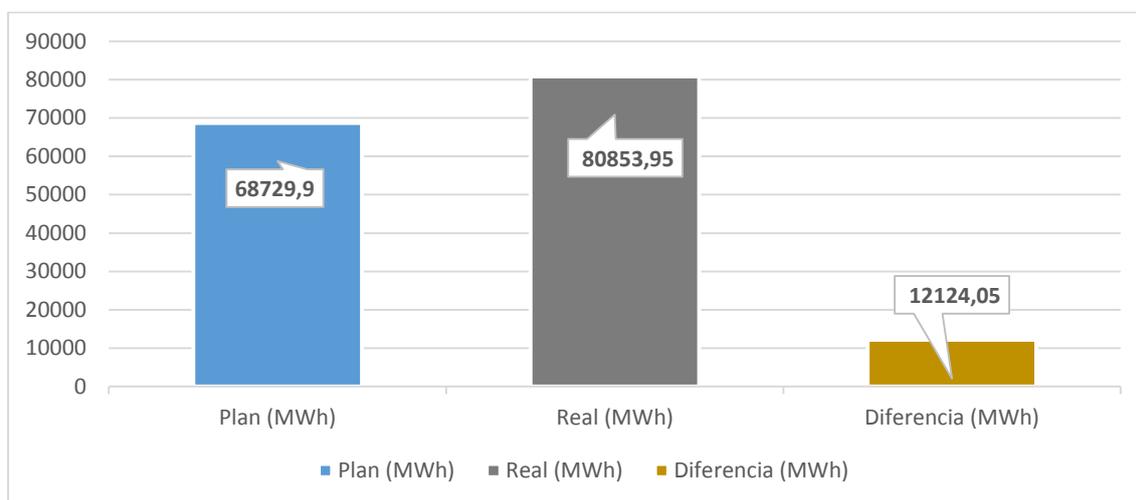


Figura 20: Generación anual de electricidad en la Central Santa Clara 110 kW.

Durante el año 2016 la generación de electricidad en la central Santa Clara 110kV fue de 80853,95 MWh superior a la planificada 68729,9 MWh, para ello fue necesario aumentar las horas de trabajo de los motores lo que afectó considerablemente el consumo de combustibles en Planta, aunque se logró exceder la generación planeada en 12124 MWh, de lo que se concluye que el comportamiento de la central para con la demanda energética nacional es confiable de acuerdo a los índices de generación.

3.3 Impacto Ambiental.

La valoración del impacto ambiental se realizó en torno a los niveles de emisiones contaminantes que se obtuvieron en la planta a través de especialistas de Pentol quienes realizaron las mediciones pertinentes para diferentes regímenes de carga.

Tabla 10a: Mediciones tomadas por Pentol.

Parámetros	U/M	Motor1	Motor2	Motor3	Motor4	Motor5	Motor6
Oxígeno O2	%	12.73	12.54	12.11	-	12.21	12.37
Monóxido CO	ppm	461	408	533	-	556	471
Dióxido	%	6.26	6.25	6.56	-	6.49	6.38
NO-----NO	ppm	4624	4408	4830	-	4959	4368
NOx-----NOx	ppm	4624	4408	4830	-	4959	4368
Temp. Gases Salida.	°C	350	370	370	-	360	350
% Carga	%	75	80	80	-	75	60
Velocidad. Turbo	rpm	3687	3790	3720	-	36010	3736
Posición Gobernador		6	6	6.5	-	6	5
Presión Aire de Carga	Bar	2.4	2.4	2.4	-	1.6	2.2
Temp. Aire de Carga	°C	54	55	58	-	56	56
Presión de Comb.	Bar	8.5	8.5	8.5	-	7.1	7
Temp. de Combustible	°C	130	132	135	-	139	139
Temp. Gases Ent.	°C	346	337.7	357.7	-	358.2	349.2
Horas de Operación	horas	45047	44975	47534	-	41971	47092

Tabla 10b: Mediciones tomadas por Pentol.

Parámetros	U/M	Motor7	Motor8	Motor9	Motor 10	Motor 11	Motor 12
Oxígeno O2	%	12.31	12.38	12.01	11.76	12.97	12.15
Monóxido CO	ppm	490	490	513	501	359	542
Dióxido	%	6.42	6.37	6.65	6.83	5.94	6.53
NO-----NO	ppm	4703	4299	4082	3909	3022	4274
NOx-----NOx	ppm	4703	4299	4082	3909	3022	4274
Temp. Gases Salida.	°C	360	350	370	370	370	370
% Carga	%	75	85	75	80	80	85
Velocidad. Turbo	rpm	3553	3856	3683	3795	3996	3895
Posición Gobernador		5	6.5	6.5	6.5	6	6
Presión Aire de Carga	Bar	2.5	2.5	2.4	2.4	2.4	2.5
Temp. Aire de Carga	°C	54	47	58	54	55	52
Presión de Combustible	Bar	7.2	7.2	8.5	8.5	8.5	8.5
Temp. de Combustible	°C	134	134	135	135	135	135
Temp. Gases Ent.	°C	357.2	337	363.3	377.4	312.3	333.9
Horas de Operación	horas	40048	44958	45992	47274	45571	46169

El análisis referente a emisiones contaminantes específicas de los gases de escape productos de la combustión en los motores de la central Santa Clara 110 kV es por medio de mediciones tomadas por Especialistas de Pentol. Donde fueron evaluadas las emisiones de Oxígeno O₂ y Dióxido en %, para diferentes regímenes de carga en los motores y temperaturas de los gases calientes a la entrada y salida del turbo, así también se determinó en partes por millón (ppm) los valores de NO y NOx.

3.4 Balance térmico del motor.

La siguiente tabla se confeccionó a partir de los datos reales de operación en planta obtenidos mediante el control de operadores, donde se obtuvo que el consumo promedio de la planta en el año 2016 fue de 220g/kWh, consecuente a un régimen promedio de carga del orden de 1,3 MW, lo que representa que los motores se encontraron operando como promedio general al 76 % de su carga nominal.

Tabla 11: Parámetros típicos en la central obtenidos por el control de operadores.

Motor	Combustible Fuel oil	Consumo específico al factor de carga dad.			Unidades De potencia(MW)	Factor de carga (%)
		g/kWh	(kWhf/kWhe)	(kg/h)		
Himsen Hyundai	NCV, MJ/kg				1.7	0.76
	40.5	220	2.47	284.24		

Sea valor calórico del (Fuel oil)H_u= 40,5 MJ/kg y el consumo horario G_c=284.24 kg/h, se tiene que Q_o el calor introducido al motor con el combustible se calcula mediante la expresión (2).

$$Q_o = \frac{284.24 \text{kg}}{\text{h}} * \frac{\text{h}}{3600\text{s}} * 40.5 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} * 1000\text{kJ/MJ} = 3197.7 \text{ kW} = 3.197\text{MW}$$

Según la metodología antes expuesta (Jóvaj 1987, PIEDRAHITA 2009) se obtuvo las componentes del balance térmico del motor.

Tabla 12: Parámetros del balance térmico del motor Himsen Hyundai de 1,7MW utilizado en la Generación Distribuida.

Trabajo efectivo		Gases de escape		Agua de enfriamiento		Calor restante		Calor entregado al Lubricante	
q_e (%)	Q_e (kW)	q_g (%)	Q_g (kW)	q_{ref} (%)	Q_{ref} (kW)	q_r (%)	Q_r (kW)	q_l (%)	Q_l (kW)
40	1300	32	1028	18	578	4	132	5	159

Lo que representa que de la (Q_o) la cantidad total de calor introducida con el combustible al motor en el régimen de carga dado, el 40% es calor equivalente al trabajo efectivo del motor, y el 60% representa Q_{ref} el calor cedido al medio refrigerante; Q_g , el calor que se lleva al motor los gases de escape; Q_c , la parte del calor del combustible que se pierde debido a su combustión incompleta; Q_l , el calor entregado al lubricante; Q_r , el termino independiente que determina las pérdidas no incluidas en las demás componentes del balance térmico.

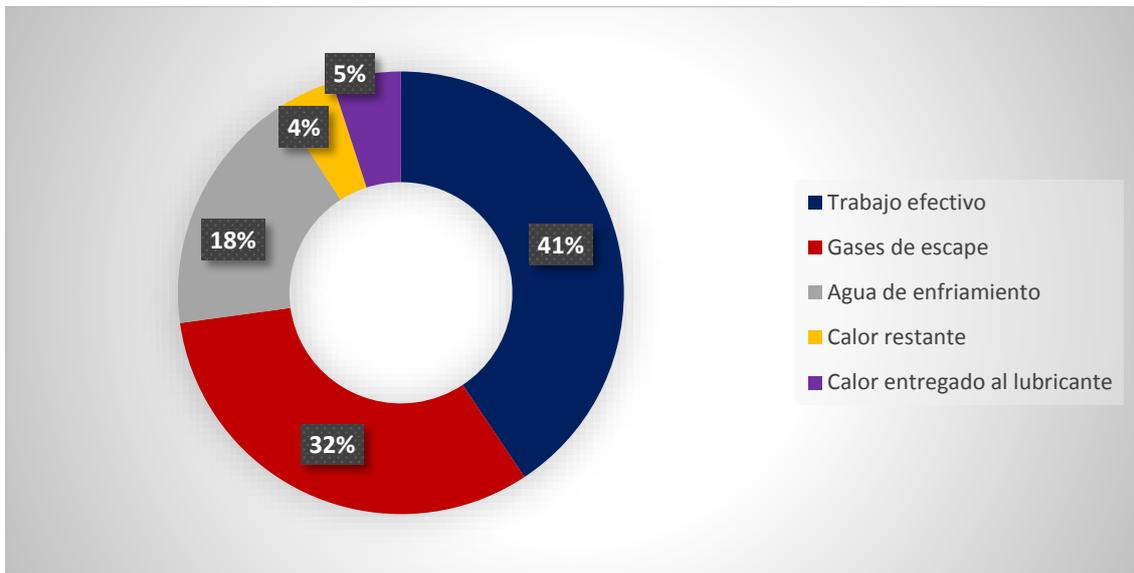


Figura 21: Representa la distribución en % de los parámetros de la combustión en el motor Himsen Hyundai de 1,7 MW.

Se aprecia en la figura 21 que donde existe mayor potencial térmico es en los gases de escape y el agua de enfriamiento, comportamiento que se tendrá en cuenta para posteriores estudios con el fin de explotar esos potenciales al máximo permisible y económicamente factible.

3.5 Balance térmico del agua en la caldera recuperativa.

Se analiza el comportamiento térmico del agua en la caldera, donde se obtuvo como resultado el calor que demanda la generación de vapor, valor que demuestra que el proceso de generación de vapor no requiere de toda la energía térmica contenida en los gases de escape del motor, ya que estos gases calientes como se explicó en el esquema de la batería son regulados a través de una válvula Dámper, la cual en función de bypass controla la cantidad de gases calientes que entran a la caldera aumentando o disminuyendo la generación de vapor según sea la demanda del mismo, de igual manera el potencial de calor que representan los gases que no se introducen a la caldera son expulsados por la chimenea, representando el potencial teórico de energía residual en la planta específico de los gases de escape.

Tabla 13: Calor que demanda la generación de vapor.

Calor generación de vapor	Caldera
$Q. dem_{vapor}$ (kW)	95,22kW

Dado las proporciones de la caldera recuperativa la generación de vapor solo cubre los procesos requeridos en la instalación, como se aprecia para implementar un sistema de cogeneración donde la demanda de vapor sería mayor, es necesario rehacer las calderas con la finalidad de aprovechar toda la parte disponible del calor que arrastran los gases de escape del motor.

3.6 Balance térmico del combustible en el HTU.

Para el análisis térmico del combustible se parte del HTU (Unidades de tratamiento del combustible), para ello se fijan los parámetros de referencia obtenidos por el (National Electric Union 2010).

Tabla 14: Análisis térmico de la caldera comportamiento de los gases y potencial residual.

Gases	
Cp (gases) kJ/kgK	1,015
Temp. Salida motor (°C)	280 - 350
Temp. Salida Caldera (°C)	150 - 250
Masa de gases $kg_{gas}/kg_{comb.}$	36,14
Potencial Bruto de calor (kW) x 4motores	$1028.37 \times 4 = 4113$
Efic. En el intercambiador de calor	0.9

Calor cedido (kW)	2032
Masa de gases kg _{gas} /s	11.40
Calor Neto (kW)	1810

Estos resultados se refieren a una batería por eso fue necesario afectar por 4 el potencial bruto de calor lo que permitió a través del software EES, la parametrización de dichos valores, variando sus propiedades y condiciones para evaluar su estado a diferentes temperaturas y regímenes de carga.

Tabla 15: Análisis térmico del combustible en la unidad de tratamiento HTU.

Parámetros HTU	Referencia
Cp (Fuel oil) kJ/kg°C	1,74
Consumo esp. (g/kWh)	220
Pot. (kW)Factor de carga 76%	1300
Consumo Horario (kg/h) x4 motores	1136
Temp. Comb. Ent. calentador	75 - 90
Temp.precal. comb. (°C)	120 - 149

Tabla 16: Calor cedido al combustible por el vapor en el HTU.

Calor cedido al combustible	HTU
$Q. nec_{comb}$ (kW)	28.57kW

El calor que requiere el HTU para tratamiento térmico del combustible es suministrado por la caldera recuperativa con alta eficiencia, se concluye que las calderas recuperativas se encuentran operando eficientemente, aunque para la implementación de un sistema de cogeneración ya sea frío/calor, el vapor requerido sería mayor, de manera que sería necesario rehacer las calderas con la finalidad de aumentar el aprovechamiento del potencial térmico de los gases y así garantizar la demanda térmica que requieren los sistemas de cogeneración. La caldera propuesta debe ser capaz de suplir los procesos actuales que requieren vapor a 160 °C y satisfacer el sistema cogenerativo sea frío o calor, el cual se escoge según la necesidad del servicio y la factibilidad de su aplicación.

3.7 Balance térmico de los gases de escape en la caldera.

Tabla 17: Análisis térmico de la caldera comportamiento de los gases y potencial residual.

Gases	
Cp (gases) kJ/kgK	1,015
Temp. Salida motor (°C)	280 - 350
Temp. Salida Caldera (°C)	150 - 250
Masa de gases kg _{gas} /kg _{comb.}	36,14
Potencial Bruto de calor (kW) x 4motores	1028.37x4 = 4113
Efic. En el intercambiador de calor	0.9
Calor cedido (kW)	2032
Masa de gases kg _{gas} /s	11.40
Calor Neto (kW)	1810

Estos resultados se refieren a una batería por eso fue necesario afectar por 4 el potencial bruto de calor lo que permitió a través de software EES, la parametrización de dichos valores, variando sus propiedades y condiciones para evaluar su estado a diferentes temperaturas y regímenes de carga.

3.8 Resultados obtenidos mediante el software (EES), Engineering Equation Solver.

Con el desarrollo de la metodología para el balance térmico del motor mediante el software antes expuesto se confeccionaron las siguientes figuras.

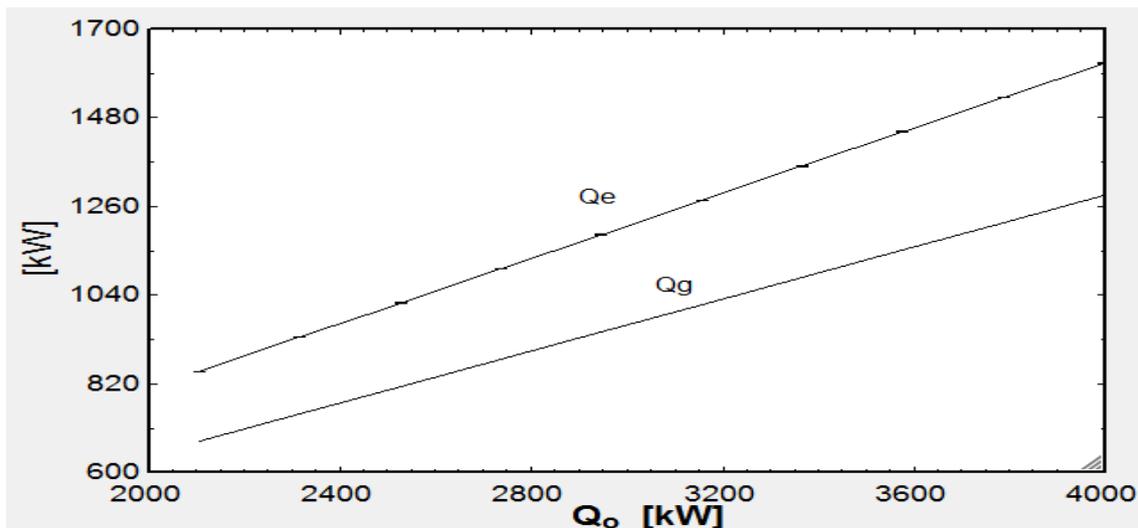


Figura 22: Representa la relación de calor Q_o vs Q_e , Q_g , respectivamente.

De la figura 22 se obtiene la relación de calor introducido con el combustible al motor Q_o y los potenciales Q_e y Q_g , potencia de salida y gases de escape respectivamente, dado que Q_o depende del poder calórico del fuel oil y consumo específico del mismo para un régimen de carga fijado, en consecuencia, variaran los potenciales de calor residual y potencia de motor.

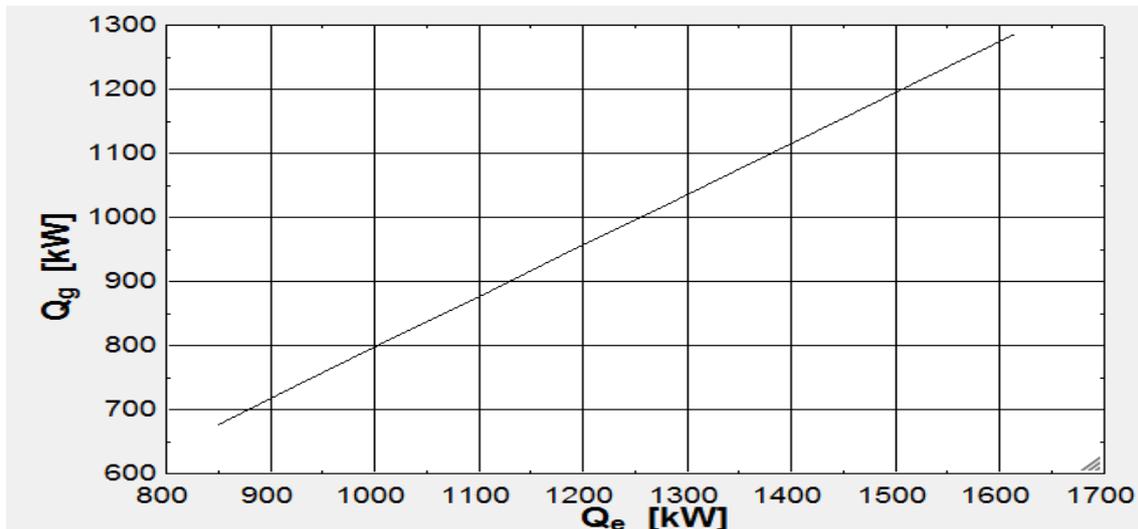


Figura 23: Representa la relación de potencia Q_e y potencial térmico Q_g que arrastran los gases de escape.

De la figura 23 se aprecia que en medida que sea mayor la potencia de salida del motor Q_e en correspondencia será mayor el potencial térmico Q_g , resultado que se obtuvo variando el factor de carga en los motores, se debe aclarar que del estudio realizado en la central no se encontró operando ningún motor por encima del 85 % de carga y el análisis realizado tiene en cuenta la variación del estado de carga desde 50 a 100%, este último poco probable, aun así es resultado de como variaría Q_g , respecto a los estado de carga bajo el cual operan los motores en la central.

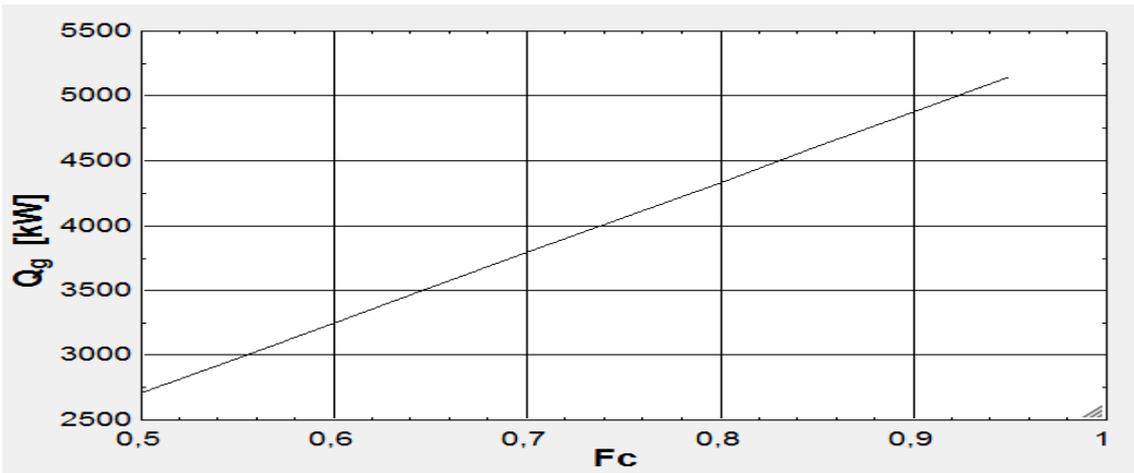


Figura 24: Representa la variación de Q_g respecto al régimen de carga en los motores.

La figura 24 muestra la relación directa entre la carga y el potencial residual de calor que representan los gases de escape, lo que permite establecer una relación entre la electricidad generada y el calor rechazado.

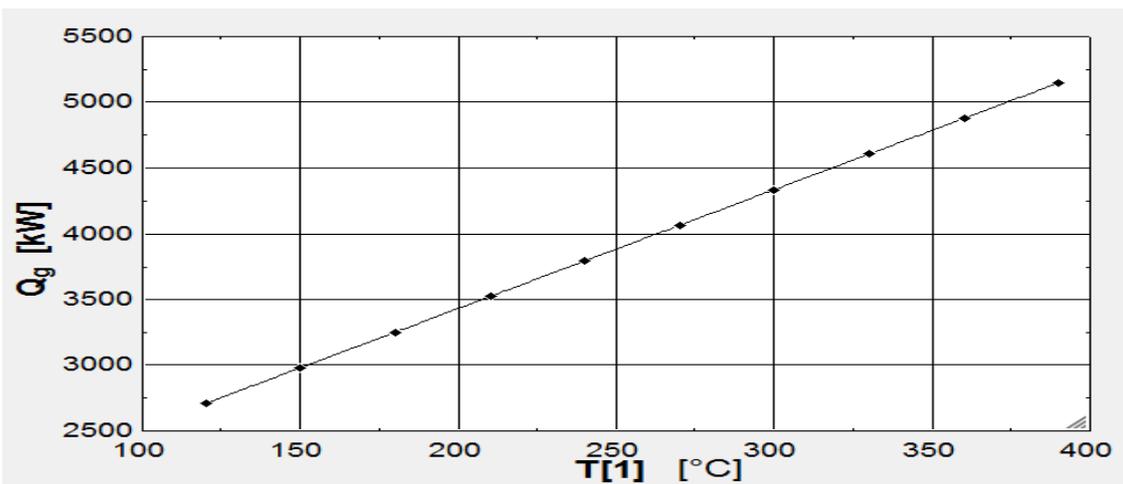


Figura 25: Representa la variación de Q_g respecto a la temperatura de salida de los gases en la caldera.

Para el siguiente análisis se tuvo en cuenta que una batería está compuesta por 4 motores los cuales descargan los gases de escape a una caldera recuperativa común y los análisis anteriores solo se referían a un solo motor, para lograr establecer una relación teórica entre Q_g y Ex_g , gases calientes y exergía de los gases respectivamente fue necesario afectar por 4 el potencial térmico que representa a los gases de escape, la figura 25 se desarrolló como resultado de variar los estados de carga en el motor, lo que directamente incidió en los gases de escape de manera que se puede evaluar la exergía en

esos gases a la salida de la caldera, aunque según la metodología utilizada para el análisis exergético la exergía estaría determinada por la variación de la temperatura de entrada de los gases a la caldera, así se fijaron temperaturas prescritas del manual de operación dando como resultado la siguiente figura.

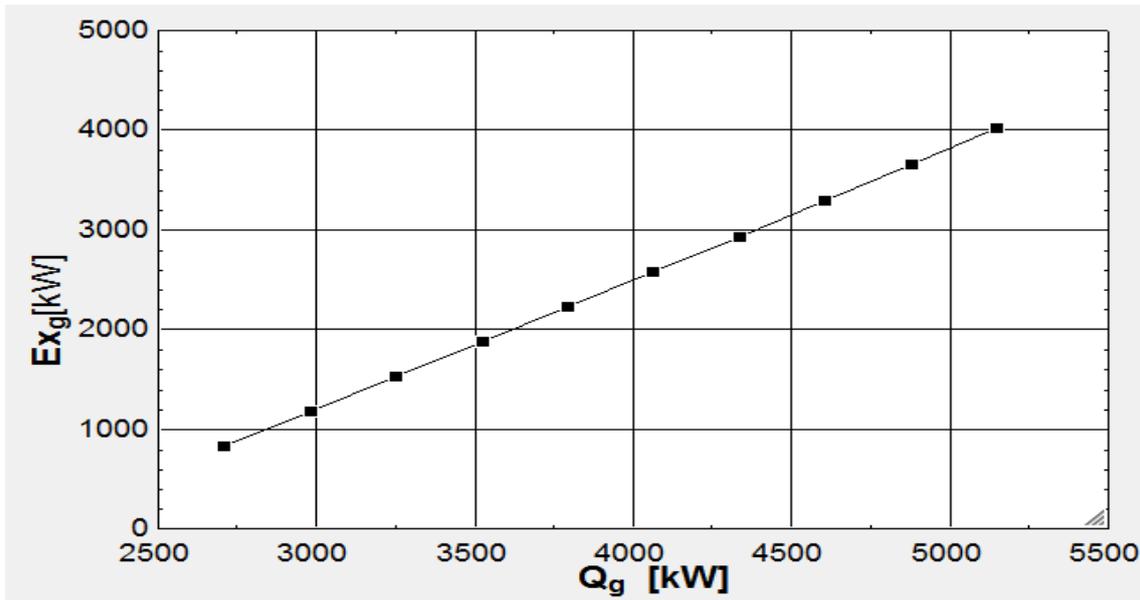


Figura 26: Representa la variación de Q_g , gases de escape y la exergía contenida en los mismos Ex_g .

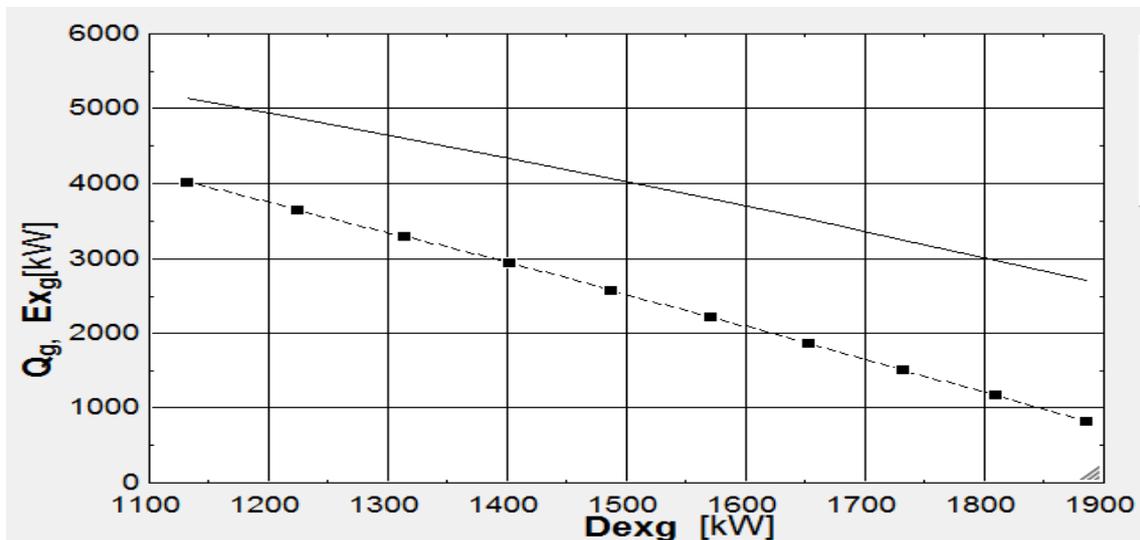


Figura 27: Representa Q_g , gases escape y Ex_g , exergía de los gases de escape contra la destrucción de exergía, D_{exg} .

Como la exergía Ex_g representa la parte del potencial térmico en los gases de escape que puede utilizarse para transformarse en trabajo (figura 26), y el término D_{exg} representando la destrucción de la exergía en los gases de escape que son debidas a irreversibilidades del sistema, la figura 27 muestra la

disponibilidad de calor que hay en la central Santa Clara 110 kV que pudiese aprovecharse mediante el término cogeneración.

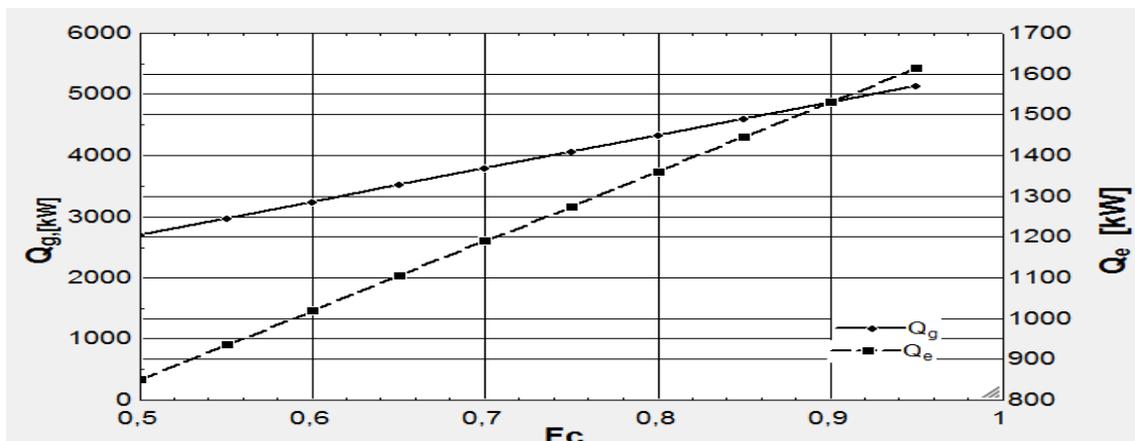


Figura 28: Representa Fc, factor de carga contra Qg, gases de escape y Qe, potencia eléctrica.

De la figura 28 se aprecia que existe relación directa entre la potencia eléctrica Qe y térmica Qg, es válido destacar que los valores de Qg son correspondientes a una batería en conjunto 4 motores para diferentes regímenes de carga. El volumen de gases es mayor teniendo en cuenta que existen en operación 12 motores, consecuentemente el potencial térmico real de la planta es mayor que el representado, solo que, su aprovechamiento está determinado por la capacidad de la caldera que para el caso de estudio sea una caldera recuperativa, abastece eficientemente la demanda de vapor de la Central Santa Clara 110 kV, pero no recupera todo o gran medida el calor que arrastran los gases calientes a la salida del motor de lo que se concluye que es necesario rehacer las calderas.

Tabla 18: Razón de calor/electricidad del motor Himsen Hyundai 1,7 MW.

Sistemas de cogeneración	Razón Calor/electricidad [kW_{th}/kW_e]	Gases de escape Qg(kW)	Potencia eléctrica Qe(kW)
Motores estacionarios	1,26	1028	1300

En la tabla 18 se tiene la razón entre el calor y la electricidad generada por motores Himsen Hyundai de 1,7 MW de potencia operando al 75 % de su carga nominal, se verifica la correspondencia con la tabla 3 donde se expresa en intervalos dicha razón para este tipo de tecnologías.

Conclusiones

Del análisis previo a la central Santa Clara 110 kV con el objetivo de estudiar la factibilidad de alternativas de poli generación a partir del potencial de energía residual existente en las plantas de potencia a base de Grupos Electrógenos de fuel oil se concluye que durante el año 2016:

1. La utilidad de la generación distribuida a nivel mundial es muy difundida, las ventajas de su aplicación varían en tamaño y potencia requerida, nuestro país conoce los beneficios de dicha tecnología y su desempeño en cuba es favorable con alto grado de confiabilidad.
2. El régimen de carga más probable identificado en planta es de 76 %, equivalente a 1,3 MW de lo que se tiene un índice de consumo de combustible fuel oil de 220 g/kWh.
3. Se sobre cumplió el plan de generación de electricidad anual en 12124 MWh, para ello fue necesario aumentar el tiempo planificado de trabajo de los motores y con ello la disponibilidad real de la planta.
4. Del análisis y balance térmico del motor Himsen Hyundai se tiene que el mayor potencial térmico lo representan Q_g y Q_{ref} , gases de escape y calor de refrigeración respectivamente, por tanto es aquí donde se verificara la potencialidad de implementar un sistema de cogeneración que aproveche el calor disponible.
5. Del análisis y balance térmico del motor y posteriormente la caldera se aprecia que el potencial de calor residual aprovechable para la cogeneración es de 1810 kW, a una temperatura a la salida de la caldera de 250°C.

Recomendaciones

- Estudiar detalladamente los índices de gases contaminantes y los daños que este trae al medio ambiente y la sociedad.
- Realizar un análisis más detallado de la factibilidad de poli cogeneración a través del uso de los gases residuales que son expulsados de la caldera, teniendo en cuenta que dicha central tiene una potencia total instalada del orden de 20.4 MW referentes a 12 motores de 1,7 MW cada uno, distribuidos en 3 Baterías, ya que en el desarrollo de este proyecto se analizó una Batería compuesta de 4 motores.
- Investigar nuevas tecnologías para la poligeneración y su viabilidad o factibilidad de implementación en la planta.

Bibliografía

A.Boles, Y. A. C. a. M. Thermodynamic.

Agudelo, J. R. (2006). "Análisis de primera y segunda ley de un motor operando con biodiesel de palma. Parte 2: Balance exergético global." revista energetica.

Avella, J. C. C. "Cogeneración." Unidad de planeación minero de Colombia.

Cinemat (1991). MEDIDA de la Contaminación Atmosférica Procedente de Centrales Térmicas. Medida de Emisiones. Madrid.

CUNALATA, D. V. I. (2013). "DISEÑO DE UN SISTEMA DE SEGURIDAD INDUSTRIAL Y SALUD OCUPACIONAL DE LA UNIDAD DE NEGOCIOS ELECTROGUAYAS CELEC EP CENTRAL TÉRMICA." MECÁNICA ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

Distribuida, G. (2008). "cuba-segundo-pais-en-porcentaje-de-generacion-distribuida." Retrieved 2008/08/11, from <http://rreloj.wordpress.com/2008/08/11/cuba-segundo-pais-en-porcentaje-de-generacion-distribuida>.

Flórez Orrego, D., Silva Ortiz, Pablo (2013). Exergía, Conceptualización y Aplicación Escuela Politécnica de la Universidad de Sao Paulo.

Garrido, S. G. Turbinas de Gas.

GDECU, G. D. d. E. C. (2016/06/24). "funcionamiento de las centrales eléctricas." Retrieved 2016/06/24, 2016, from <http://www.unesa.es/sector-electrico/funcionamiento-de-las-centrales-electricas/1343-central-ciclo-combinado>.

Gonzales, A. M. R. (2015). GENERADORES DE VAPOR, funcionamiento y explotación. Santa Clara, Cuba.

Herrera, S. D., Ed. (mayo del 2009). Manual de Gestión para la Generación Distribuida de la electricidad en Cuba. GENERACIÓN DISTRIBUIDA DE ELECTRICIDAD EN CUBA.

Jóvaj (1987). Motores del automóvil.

Klein, S. A. (1992 - 2012). "Engineering Equation Solver."

Kotas (1995).

Luís Manuel García Rojas, J. R. G., Carlos Martínez, Fernando and L. L. D. C. González Ortega (2011). "PROPUESTA DE APROVECHAMIENTO DEL CALOR DE LOS GASES DE ESCAPE DE LOS GRUPOS ELECTRÓGENOS A FUEL-OIL UBICADOS EN LA CIUDAD DE PINAR DEL RÍO." Revista Científica Avances **13**.

M. J. Moran, H. N. S. E. R. FUNDAMENTOS DE TERMODINAMICA TECNICA.

Madrid (2010). "Guía de cogeneración." Science article.

Magán, A. H. (2004). INSTALACION DE PLANTA DE POLIGENERACION DE ENERGIA EN UN HOTEL DE SALOU. Department of Engineering.

Management, E. C. a. (2008). "First and second law analysis of diesel engine powered cogeneration systems." ELSEVIER.

Marsdon, J. (2006). "Distributed Generation Systems: A New Paradigm for Sustainable Energy." Retrieved 24/06/2016, 2016, from <http://DistributedGeneration.com/2006/systems>.

MARTÍN NUÑEZ, J. M. M. (2013). "Process Integration Techniques for Cogeneration and Trigeneration Systems ".

Moya, I. H. (Diciembre de 2011). Análisis del impacto ambiental asociado a las Centrales Eléctricas fueloil Santa Clara 110 kV y Santa Clara Industrial: 47.

National Electric Union (2010). Management Manual (MAGEST). Cuba.

Özkan, M. (2015). "A Comparative Study on Energy and Exergy Analyses of a CI Engine Performed with Different Multiple Injection Strategies at Part Load: Effect of Injection Pressure ".

PIEDRAHITA, C. A. R. (2009). CONTRIBUCIÓN AL CONOCIMIENTO DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO Y LA GESTIÓN TÉRMICA DE LOS MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA ALTERNATIVOS DEPARTAMENTO DE MÁQUINAS Y MOTORES TÉRMICOS UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

Romero, I. V. (2011). Desarrollo Metodologico para el analisis de la viabilidad de un proyecto de microgeneracion. Ingeniería Mecánica. Facultad de Ingeniería de la UNAM Ciudad Universitaria, Universidad Nacional Autonoma de Mexico: 163.

Torres, Y. L. (2010). Estudio y uso del Lodo producido en la Generación Distribuida. Departamento de Energía, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas: 30.

TURTÓS, C. L. (2004). "Externalidades ambientales atmosféricas de la generación eléctrica.".

US Energy Information Administration (15 de mayo de 2017). "Heating Oil Spot Price FOB, US\$ per gallon."

Anexos

Anexo1



Figura 1: Vista área de la central eléctrica fuel oil santa clara 110kV.