

**Universidad de Sancti Spíritus “José Martí Pérez”**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Centro de Estudios de Energía y Procesos**  
**Industriales**



**TÍTULO**

**“EVALUACIÓN DE LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA DE  
ELECTRICIDAD CON MOTORES FUEL OÍL, MEDIANTE  
INDICADORES DE SOSTENIBILIDAD. CASO DE ESTUDIO  
PLANTA FUEL OÍL SANCTI SPÍRITUS”**

Tesis presentada en opción del grado académico de Máster en  
Ciencias

**Autor:** Ing Osvaldo Pérez Pérez

**Tutores:**

MsC Edelvy Bravo Amarante.

DrC Zuleiqui Gil Unday

**Año 2015**

## **RESUMEN**

La provincia de Sancti Spíritus cuenta con una Central Eléctrica de Fuel-Oil, en funcionamiento desde mayo del 2007, tienen en la actualidad ocho años generando para el Sistema Electroenergético Nacional (SEN). En los años de explotación de esta, no se ha realizado un estudio acerca de la sostenibilidad de la generación ni el impacto que esto tiene para el ecosistema. El presente trabajo tiene como objetivo realizar un análisis de sostenibilidad energética en la generación distribuida, tomando como material de estudio dicha central, a partir de la recolección, medición y análisis de datos en los diferentes procesos que allí se llevan a cabo, para el estudio se toman como herramientas, el balance de masa, análisis energético, exergético, así como el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), mediante estas se determina la sostenibilidad del proceso de generación y su impacto en el ecosistema.

	Índice	Pág
<b>Introducción.....</b>		<b>1</b>
<b>Capítulo I: Fundamentos teóricos.....</b>		<b>3</b>
1.1		6
1.2		7
1.3		10
1.4		11
1.5		12
<b>Capítulo II: Materiales y Métodos</b>		
2.2		
2.3		
2.4		
2.5		
2.6		
2.7		
2.8		
2.9		
2.10		
<b>Capítulo III Análisis de resultados</b>		
1.7		15
1.8		18
		19
		20

## **INTRODUCCIÓN**

En el pasado la producción energética se basaba en aprovechar los recursos hídricos y eólicos mediante el empleo de maquinarias rústicas como los molinos de agua y de vientos. Con la invención de la máquina térmica y los avances tecnológicos, se ha hecho un uso más eficiente de los recursos energéticos disponibles, tales como el carbón, petróleo y gas natural, favoreciendo la producción y consumo de bienes y servicios indispensables para el desarrollo social [2].

En la actualidad debido al incremento acelerado del consumo energético, el cual se estima que aumente en un 37% hasta el 2040, existe una reducción de las reservas de combustible del planeta, así como un incremento en las emisiones de gases de efecto invernadero, esto afecta el clima global y el medioambiente, condiciona además una gran inestabilidad en los precios del petróleo, según datos históricos y una elevada dependencia de su consumo; las tendencias de la demanda de petróleo varían considerablemente de una región a otra: por cada barril de petróleo que se deja de usar en los países de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), se usan dos barriles más en los no pertenecientes a la OCDE. El mayor uso de petróleo para el transporte y en la industria petroquímica provocará un aumento de la demanda, de 90 millones de barriles diarios de petróleo (bdp) en 2013, a 104 millones bdp en el 2040, si bien los precios elevados y las nuevas políticas frenarán el ritmo del crecimiento del consumo en su conjunto, estabilizándolo. Será necesario invertir unos 900 000 millones USD anuales hasta la década de 2030 en el desarrollo de la exploración y producción de petróleo y gas para satisfacer la demanda prevista, pero subsisten muchas incertidumbres sobre si esa inversión llegará o no a tiempo sobre todo, una vez que se stabilice la producción estadounidense de petróleo de formaciones compactas a principios de la década de 2020 [3].

Cuba no está exento de esta problemática ya que es un país subdesarrollado con pocas reservas de petróleo y depende en gran medida de las importaciones de este [4], es por esto que se han tomado medidas para mejorar la eficiencia

del Sistema Electroenergético Nacional (SEN) ya que en él 2004 en Cuba existía una generación base, con grandes e ineficientes plantas termoeléctricas, con 25 años de explotación como promedio, trabajando a un 60 % de disponibilidad, por lo que ocurrían frecuentes averías y el consumo de combustibles era muy elevado [5].

En el 2005, Cuba comienza a elaborar un plan de medidas para descentralizar el SEN, por lo que ubicó Grupos Electrógenos en diferentes puntos vitales de la economía en todas las provincias del país, con menos consumos de combustibles por kWh generado, mejor disponibilidad superior al 90% y valores de potencias unitarias, que en caso de avería no perjudican al SEN. También se inició el proceso de rehabilitación de las redes con el objetivo de reducir las pérdidas de distribución y los bajos niveles de voltaje, se multiplicó tres veces la producción de transformadores de distribución y se crearon modernas brigadas de linieros en todo el país [5].

Con la introducción de las nuevas tecnologías en sustitución de las termoeléctricas más ineficientes y la aplicación de un nuevo sistema de generación, se obtuvo mejoras sustanciales en la eficiencia del sistema de generación de electricidad, ya que se redujo el índice de consumo de 285 a 265 g/kWh y los insumos de 6.41% a 5.44% [5].

En el marco del Sistema Electroenergético Nacional (SEN) de Cuba, la introducción de la Generación Distribuida (GD) ha significado un paso hacia el futuro que plantea ciertos retos no sólo desde el punto de vista de la operación y mantenimiento de dichas instalaciones, sino también en su posible impacto sobre el medio ambiente. Si bien la introducción del concepto de la GD permite un uso mayor de las energías renovables, no es menos cierto que aún muchas de ellas presentan precios de mercado muy altos y tecnologías aún no probadas, lo que su introducción tiene ciertas limitantes para Cuba, por lo que actualmente se trabaja por priorizar aquellas que por sus condiciones actuales, y las propias de Cuba, son más convenientes como la energía eólica, la energía hidráulica a pequeña escala y la energía a partir de la biomasa [6].

Es por eso que la GD en Cuba ha tenido su fundamento en la instalación de más de 2000 MW en Grupos Electrógenos (GE) que utilizan como combustible

básico el fuel oil y el diesel. Esto impone un reto grande desde el punto de vista ambiental, pues la distribución a lo largo de todo el país de cientos de instalaciones de este tipo requiere de una atención y monitoreo continuo de su operación, desde el punto de vista ambiental [6].

La caracterización de estos problemas, cuáles son las acciones que se ejecutan actualmente en esta dirección, las perspectivas y planes para evitar un mayor efecto sobre el medio ambiente de las mismas, son temas muy actuales y que deben ser analizados desde el punto de vista de la eficiencia energética [6].

Estas tecnologías para la generación de energía, como toda actividad antropogénica, no están exentas de impactar el medio ambiente en las diferentes etapas de su ciclo de vida. Algunos de sus impactos se relacionan a continuación:

1. Agotamiento de materias primas no renovables consumidas durante su funcionamiento.
2. Consumo de oxígeno que contiene el aire atmosférico.
3. Se desprenden gases que perjudican al hombre, la flora y la fauna.
4. Contribuyen a la elevación de la temperatura del planeta y al efecto invernadero.
5. Son fuentes emisoras de vibraciones y altos niveles de ruido, que ocasionan molestias a los núcleos poblacionales ubicados en su cercanía.
6. Puede perjudicar la salud de las personas, sobre todo las que tienen mayor susceptibilidad individual, tales como niños pequeños, ancianos, asmáticos, afecciones neumónicas o cardiópatas crónicos.

Las emanaciones gaseosas, los residuales líquidos, sólidos y el ruido asociados a la producción de electricidad de las centrales eléctricas que utilicen combustible fuel oil (CEF) constituyen elementos contaminantes que si no son bien tratados y mitigados pueden afectar los niveles permitidos de contaminación del medio ambiente y afectar la calidad de vida de las personas que viven cercanas a dichas plantas, e incluso, algunas no tan cercanas, ya que los contaminantes gaseosos y líquidos a veces tienen sus efectos en zonas alejadas a donde se producen [6].

La provincia de Sancti Spíritus cuenta con dos centrales eléctricas de fuel oil, una ubicada en Trinidad, emplazamiento que cuenta con cuatro motores de 3.85 MW y la otra localizada en el propio municipio cabecera, al norte de la ciudad, en la zona industrial de la provincia con un emplazamiento de cinco motores de 3.85 MW, este emplazamiento está cercano a la ciudad, principalmente a la universidad de ciencias médicas y al reparto Olivos 3, los cuales pueden estar afectados actualmente por las emisiones procedentes de la generación.

Existen estudios realizados por el Grupo de Impacto Ambiental de la División de Energía de la empresa CUBAENERGÍA, debido a un Contrato de Servicio Científico Técnico entre dicha entidad y la Empresa Eléctrica de Sancti Spíritus, en el cual se realizan las mediciones de las emisiones de CO, SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> de los gases de combustión en los motores del emplazamiento de Sancti Spíritus y se modela la dispersión de estos contaminantes atmosféricos en un período que abarca desde una hora, un día y hasta un año, en el trabajo se localizan los receptores donde mayor incidencia tienen estos contaminantes, pero no se realiza una evaluación de su impacto ambiental, ni de la sostenibilidad y eficiencia del proceso de generación.

Existen herramientas para determinar estos impactos medioambientales, una de ellas es el Análisis del Ciclo de Vida (ACV), este es un método que ha ganado importancia en la gestión medioambiental [7]; convirtiéndose en una herramienta invaluable como soporte para la toma de decisiones ambientales [8]. Como herramienta, el enfoque del ciclo de vida está siendo cada vez más considerado dentro de las políticas del desarrollo sostenible, este se utiliza tradicionalmente para evaluar los impactos ambientales de productos, servicios o procesos a través del ciclo de vida con diferentes enfoques como “de la cuna a la tumba” [9].

El ACV es una herramienta metodológica que sirve para medir el impacto ambiental de un producto, proceso o sistema a lo largo de todo su ciclo de vida (desde que se obtienen las materias primas hasta su fin de vida). Se basa en la recopilación y análisis de las entradas y salidas del sistema para obtener unos

resultados que muestren sus impactos ambientales potenciales, con el objetivo de poder determinar estrategias para la reducción de los mismos [10].

Teniendo en cuenta lo anterior planteado es de suma importancia realizar un ACV de la generación de electricidad con fuel oil en la central eléctrica de Sancti Spíritus, pero para realizar dicho análisis se debe llevar a cabo en la central un inventario de todos las entradas y salidas a los procesos que intervienen en la producción de electricidad; por lo que se debe realizar tomas de datos, muestreos en los procesos, recopilación, lecturas y análisis de los datos existentes, ya que no se cuenta con una base de datos de este tipo, que facilite la elaboración de un correcto inventario.

Mediante este trabajo se pretende evaluar con indicadores de sostenibilidad la generación de electricidad con fuel y su impacto en el ecosistema, se escogió como caso de estudio la Central Eléctrica Fuel Oil ubicada en la provincia de Sancti Spíritus, en el trabajo se detectan las principales pérdidas energéticas y exergéticas en los diferentes procesos de generación para lo que se emplean herramientas como balances de masa, energía y exergía, y finalmente un análisis del ciclo de vida ambiental, para evaluar el impacto que tiene este tipo de tecnología, y con ello su sostenibilidad.

### **Situación problemática**

Mantener una alta competitividad energética y ambiental en las industrias y principalmente aquellas que tienen gran valor para la economía de un país, es de vital importancia, por ello en este trabajo se toma como caso de estudio la Central Eléctrica de Sancti Spíritus, ya que es la provincia con el mayor número de motores de tecnología MAN B&W 18V28/32S instalados, por lo que se plantea la problemática de evaluar el impacto medioambiental de la generación de electricidad con fuel oil, mediante indicadores de sostenibilidad.

### **Problema científico**

La falta de un estudio de los indicadores de sostenibilidad en la Central Eléctrica Fuel Oil Sancti Spíritus, limita evaluar el impacto medioambiental que tiene este sobre el ecosistema.

## **Objeto de estudio**

La sostenibilidad en la generación del Grupo Electrógeno Fuel Oíl Sancti Spíritus.

## **Hipótesis**

Si se realiza un estudio de los indicadores de sostenibilidad en la Central Eléctrica Fuel Oíl Sancti Spíritus, será posible evaluar el impacto real que tiene sus procesos para el ecosistema.

## **Objetivo general**

Evaluar la sostenibilidad del proceso de generación de la Central Eléctrica Fuel Oíl de Sancti Spíritus.

## **Objetivos específicos**

1. Definir de acuerdo a las características del proceso, el objetivo y alcance del estudio.
2. Desarrollar balances de masa y energía para obtener los inventarios primarios del proceso.
3. Desarrollar el inventario para el Análisis de Ciclo de Vida del proceso productivo.
4. Identificar los principales impactos ambientales de la generación de electricidad con fuel en Sancti Spíritus, a partir del análisis de ciclo de vida del proceso.
5. Identificar las ineficiencias asociadas al proceso de generación, a partir del balance exergético del proceso.
6. Evaluar mediante indicadores de sostenibilidad la generación de electricidad con fuel oil en Sancti Spíritus.

## **Justificación de la investigación y su viabilidad**

Este trabajo es novedoso para la generación en la Provincia de Sancti Spíritus y para el país, ya que se aplica un, balance de masa, energético y exergético en los diferentes sistemas de la planta, lo que determina sus principales pérdidas, además mediante un Análisis del Ciclo de Vida se obtiene el impacto medioambiental que tiene sobre el ecosistema; todos estos acciones conllevan a minimizar las pérdidas y a evaluar la sostenibilidad del proceso en general.

## **1. Capítulo 1 Marco teórico y referencial de la investigación**

### **1.1 Situación energética mundial**

La energía es la savia de la economía y la sociedad. El modo de obtención y gestión de la energía está en la base de la relación de la actividad humana con el medio ambiente. Por eso, el modelo energético de los países define el posicionamiento de cada país con respecto a un modelo de crecimiento sostenible económica, social y ecológicamente. Más aún, el cambio en los modelos y sistemas energéticos incluyendo la seguridad en el suministro energético, que es un elemento fundamental en el cambio de paradigma donde cada vez es más necesario para superar las crisis globales en las que estamos sumidos, tanto en la economía como en el medio ambiente y en la desigual distribución de la riqueza en el planeta [11].

En la civilización moderna, la disponibilidad de energía está fuertemente ligada al nivel de bienestar, a la salud y a la duración de vida del ser humano. La sociedad actual demanda gran cantidad de energía y los países más pobres muestran los consumos más bajos. El consumo energético mundial total en el 2005 fue de 138.900 TWh con un 86,5% derivado de la combustión de combustibles fósiles, aunque hay al menos un 10% de incertidumbre en estos datos ya que no todas las economías mundiales rastrean sus consumos energéticos con el mismo rigor, y el contenido energético exacto del barril de petróleo o de la tonelada de carbón varía ampliamente con la calidad [11].

Los países en vías de desarrollo, cuyas tasas de crecimiento económico y demográfico son las más elevadas, contribuyen en un 74% al aumento del consumo energético global según este escenario China y la India, por sí solas, representan un 45% de este aumento. Los países de la OCDE representan la quinta parte; las economías en fase de transición, el 6%. En conjunto, el consumo de los países en vías de desarrollo representará el 47% del mercado energético global en 2015, y más de la mitad en 2030, frente al 41% actual. La fracción de la demanda global correspondiente a los países en vías de desarrollo se amplía para todas las fuentes primarias de energía, excepto las energías renovables excluyendo la hidráulica. Alrededor de la mitad del

incremento de la demanda global corresponderá a la producción de energía eléctrica; una quinta parte, al transporte. Casi todo este incremento estará asociado con combustibles basados en el petróleo [12].

En correspondencia con lo anterior planteado, la Agencia Internacional de Energía (AIE), subraya que el consumo de energía en el mundo se incrementará en un 57% desde el 2004 hasta el 2030, a pesar de que los precios tanto del petróleo como del gas natural, continúen también en aumento. Gran parte de este incremento será producido por los países con economías emergentes en vías de desarrollo. Prevé además que el consumo de energía en el mercado experimente un incremento medio de un 2,5% por año hasta el 2030 en los países no pertenecientes a la Organización de Cooperación para el Desarrollo Económico[13].

Uno de los países que forman el liderazgo de las economías emergentes son China y la India, los cuales superan los 5.4 millones de barriles al día actualmente, previéndose que a este ritmo en el 2030 será de 19.1 millones de barriles, lo que representa un mayor volumen con respecto a la combinación de Japón y Estados Unidos [13].

En la actualidad es un hecho innegable el incremento de la demanda energética por parte de las economías emergentes en los próximos 15 años; sin embargo la crisis económica global que sumerge a los países en déficits presupuestarios millonarios y frustra cualquier posibilidad de rescate, impedirá que tal demanda energética se produzca de forma vertiginosa, como prevén muchos expertos.

Cuba desde el 2005 con la instalación de nuevas tecnologías, con mayor eficiencia y disponibilidad comenzó un cambio en su modelo y sistemas energéticos, lo que mejoró la seguridad en los suministros energéticos de todo el país, todo esto trajo mejoras tanto para la economía como para el medio ambiente, pero no se ha evaluado la sostenibilidad de estas nuevas tecnologías, ni su impacto en el ecosistema.

## **1.2 Situación energética en Cuba**

La generación de electricidad en Cuba cambia su perspectiva desde el año 2005 cuando se decide descentralizar la generación por lo cual se crearon diferentes alternativas. En la actualidad la generación está basada principalmente en Centrales Termoeléctricas, hidroeléctrica y pequeñas centrales aisladas en diferentes cayos del país y la Isla de la Juventud, así como otras centrales de generación que queman combustible Diesel, Fuel Oil, y gas acompañante, asociado del petróleo. El sistema de generación está regido por una institución que pertenece al Ministerio de la Industria Básica (MINBAS), el cual se denomina Sistema Electroenergético Nacional (SEN), y se encarga de regir la generación, transformación, transmisión y distribución de la energía eléctrica formando un todo único de operación conjunta que abarca todas las instalaciones conectadas a la red nacional [14].

La Unión Eléctrica está integrada por ocho centrales termoeléctricas, radicadas en las provincias de La Habana, Ciudad de la Habana, Matanzas, Cienfuegos, Camagüey, Holguín y Santiago de Cuba (figura 1.1) y una Organización Básica Eléctrica (OBE) en cada una de las provincias, cuenta con tres parques eólicos enclavados en la Isla de Turiguanó en Ciego de Ávila 0.5 MWh, en la Isla de la Juventud 1.65 MWh y en Holguín 5.10 MWh. para un total de 7.25 MWh instalados.

Se encuentran en generación de 174 mini, micro y pequeñas centrales hidroeléctricas, distribuidas en nueve provincias del país su control es llevado por el Ministerio de la Industria Básica. La empresa mixta ENERGAS, cuenta con siete instalaciones para la generación de electricidad mediante turbinas de gas y ciclos combinados en las provincias de Matanzas y La Habana [1].

En la cogeneración de electricidad participan la Industria del Níquel, perteneciente al Ministerio de la Industria Básica con tres empresas nikelíferas y el Ministerio de la Industria Azucarera con 56 centrales actualmente activos que aportan a la generación total del país [1].



Figura. 1.1 Provincias donde se encuentran ubicadas las Centrales Termoeléctricas (CTE). Fuente: El Sector energético en Cuba 2010 [1]

Con la entrada de los grupos electrógenos sincronizados de generación distribuida se alcanzó una capacidad de 1320 MW diesel, y más de 800 MW en fuel oil con perspectivas de crecimiento de este último hasta 1700 MW. Se encuentran instalados más de 6000 grupos de emergencia, alcanzando una generación de 609,2 MW, para consumidores claves como: centros de salud, centros de elaboración de alimentos, bombeos y potabilizadoras de agua, centros vinculados a la educación, hoteles, centros vinculados al turismo y otros centros vitales de la economía [15].

Existen varias tecnologías instaladas para la generación de electricidad en las diferentes provincias del país, el mayor número de motores que emplean fuel oil para la generación de electricidad, son de marca HYUNDAI de procedencia surcoreana y potencia 1,7 y 2,5 MW fundamentalmente; también la tecnología MAN, de procedencia alemana con motores de 1,4 y 3,85 MW, utiliza el combustible fuel oil para la generación de electricidad. La provincia de Sancti Spíritus cuenta el mayor emplazamiento de este tipo en el país (MAN 3,85), básicamente ubicados en los cayos y en la isla de la juventud ver figura 1.2.

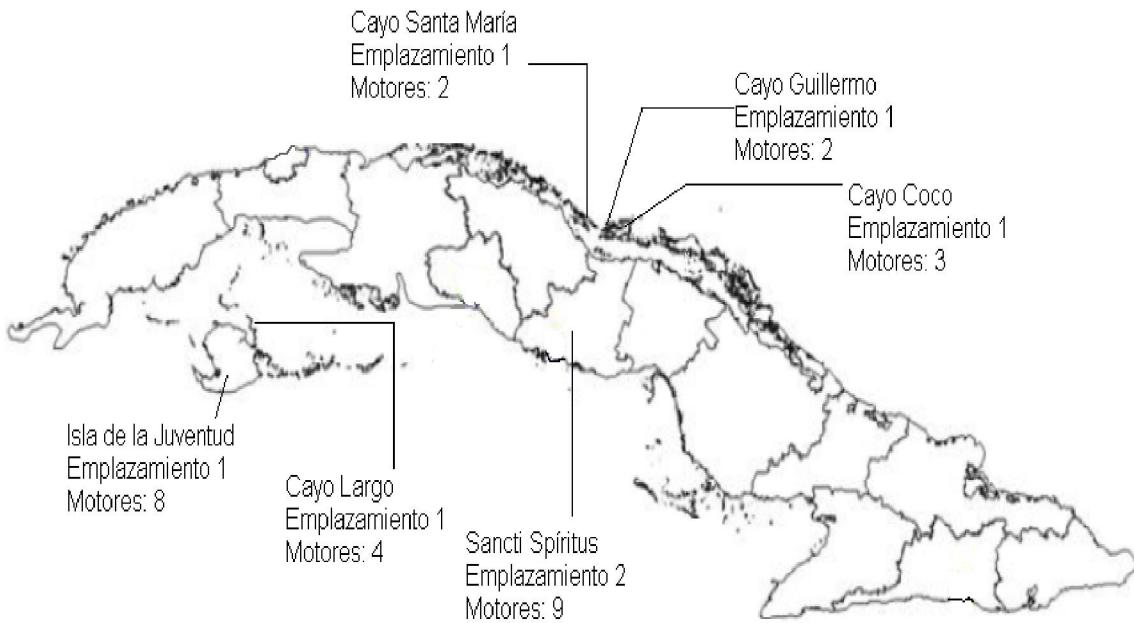


Figura. 1.2. Centrales de fuel oíl tecnología MAN B&W 18V32S280 instaladas en Cuba. Fuente: El autor

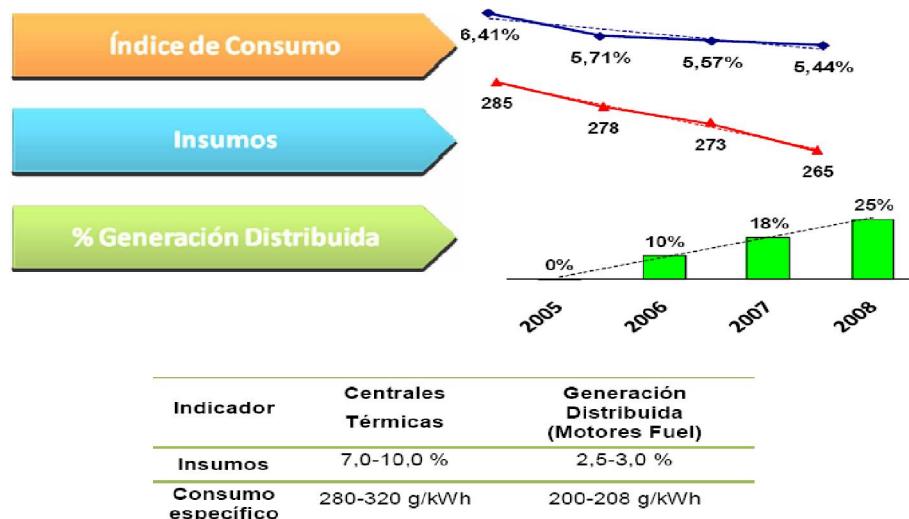


Tabla 1.1. Eficiencia en el sistema de generación en correspondencia con la aplicación de la generación distribuida desde el 2005 hasta 2008. Fuente: Informe de Balance de la Revolución Energética, Unión Eléctrica, 2009 [16].

Como se puede observar en la tabla anterior la instalación de los grupos electrógenos, minimiza el gasto de insumos, baja los niveles de consumo de combustible por kWh generado y por ende las emisiones de gases de efecto invernadero, mejorando la sostenibilidad del proceso de generación en el país.

### **1.3 Situación energética en la provincia Sancti Spíritus**

La provincia de Sancti Spíritus cuenta con tres baterías de motores Diesel, en los municipios de Fomento (7.2 MW), Trinidad (15.2 MW) y Yaguajay (15.2MW); dos plantas de Fuel Oil, una en el municipio de Trinidad (15.4 MW) y otra en Sancti Spíritus (19.25 MW), con cuatro y cinco motores, respectivamente, su capacidad de generación eléctrica individual es 3.85 MWh. La planta del municipio cabecera, inaugurada en Mayo del 2007 con ocho años de explotación y una de las primeras de su tipo en el país, entrega a plena capacidad 19.25 MW, lo que representa cerca de un 60 % de la demanda máxima de la ciudad, en horario pico.

La Central Eléctrica de Fuel Oil de Sancti Spíritus, es una Unidad Empresarial de Base perteneciente a la dirección de Generación Distribuida, tiene como objetivo la generación de energía eléctrica a partir del uso de combustible Fuel Oil, con valores de índices de consumos bajos respecto a las Centrales Termoeléctricas entre 200 y 220 g/kWh generado, así como la entrada en capacidad de generar en un menor plazo de tiempo, mantener una disponibilidad de operación superior al 90%; lo que posibilita la reducción de las pérdidas por transmisión y subtransmisión, disminuye el nivel de averías ocurridas en líneas eléctricas producto de sobrecargas y garantiza un servicio fiable y seguro al sector residencial y estatal [5].

La planta tiene dentro de las características fundamentales que está sincronizada al sistema de la red nacional, y diseñada para laborar las 24 horas en dependencia de la demanda eléctrica, lo que proporciona y garantiza gran parte de la energía demandada en el municipio, principalmente en los horarios de máxima demanda. Otra peculiaridad que es de gran importancia y distingue a este emplazamiento es que está diseñada con la posibilidad de generar energía eléctrica de forma aislada, en isla, lo que posibilita que se pueda

generar electricidad para instalaciones de producción y servicio en situaciones excepcionales, huracanes, desastres naturales y acciones de la defensa.

Actualmente Cuba, sigue encaminado a elevar la eficiencia en el SEN, para un mayor desarrollo del sistema estatal y bienestar de la población en general; para el logro de este objetivo se debe pasar a una nueva fase, optimizando cada proceso productivo dentro de las plantas de generación, por lo cual se debe determinar las pérdidas energéticas y exergéticas en cada proceso y un plan de medidas a realizar con el fin de obtener un proceso más eficiente y limpio.

La generación de electricidad mediante el combustible fuel oil conlleva a diferentes impactos ambientales, que pueden ser locales, regionales o globales. El efecto local incluye la emisión de material particulado; mientras que los efectos regionales incluyen la emisión de gases de efecto invernaderos, nocivos para la salud humana y para el entorno, ocasionando las lluvias ácidas, provocadas por el dióxido de azufre y óxidos nitrosos, todos producidos por la combustión del combustible. Por otra parte, se conoce que un mejor uso de los recursos mejora la competitividad y los beneficios de una empresa, al mismo tiempo que mejora su desempeño ambiental. Por lo tanto, comprender y cuantificar las implicaciones ambientales de la generación de electricidad en Cuba y específicamente en la provincia de Sancti Spíritus, ayudará a que esta importante industria tome un camino hacia la sostenibilidad [17].

#### **1.4 Antecedentes al trabajo.**

En la central eléctrica de Sancti Spíritus se lleva a cabo desde el año 2012, por el marco de un Contrato de Servicio Científico Técnico entre la empresa eléctrica y el grupo de impacto ambiental de la división de energía de la empresa CUBAENERGÍA, estudios acerca de la evaluación de la contaminación atmosférica (emisión y modelación), en estos estudios se representan las emisiones de CO, SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> de los gases de combustión de cada uno de los motores ([anexo #](#)), se realiza la estimación de las emisiones, se modela la dispersión de estos contaminantes hasta 20 km de las fuentes y se obtienen sus concentraciones incrementales en el aire, en el periodo de hasta un año.

Para resolver la dispersión local de contaminantes se utiliza el sistema de modelos AERMAP-UsodeSuelo-AERMET-AERMOD, teniendo en cuenta la topografía del terreno, el uso del suelo, la deposición de los contaminantes, entre otros aspectos importantes.

Los modelos de calidad de aire utilizan técnicas numéricas y matemáticas para simular los procesos físicos y químicos que experimentan los contaminantes en el aire en aras de determinar cómo estos se dispersan y reaccionan en la atmósfera. A partir de los datos meteorológicos, topografía, uso del terreno e información de la fuente emisora, los modelos estiman las concentraciones incrementales de los contaminantes primarios que son emitidos directamente a la atmósfera y, en algunos casos, de los contaminantes secundarios resultantes de reacciones químicas que tienen lugar en la misma.

Se comparan los resultados con la normativa vigente de emisiones y de calidad del aire (aire en asentamientos poblacionales) y en su defecto, de las actuales Guías de Organismos Internacionales, como la Guía de Calidad del Aire de la Organización Mundial de la Salud (OMS).

Este trabajo logra concluir que las emisiones de los contaminantes medidos ( $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$ ) en las chimeneas de los motores no superan las emisiones máximas permisibles (EMA) exigidos por la norma cubana NC TS 803:2010 [18], que regula las emisiones de este tipo de fuentes de energía.

La modelación de los contaminantes arrojó afectaciones de la calidad del aire (valores por encima de la norma de Calidad de Aire [19]) debido a las emisiones de  $\text{NO}_x$  y  $\text{SO}_2$  para 1 hora y 24 horas, no así para el  $\text{CO}$ . Estas emisiones en el periodo de evaluación para 1 año no incumplen con la norma cubana de calidad del aire.

El trabajo no tiene como objetivo la evaluación del impacto ambiental de estos contaminantes, ni evalúa la eficiencia del proceso de generación en general, aunque sus mediciones y simulaciones nos permiten tener una noción de la localización de los receptores que se ven afectados principalmente por dichas emisiones.

Existen estudios de análisis exergético en una central termoeléctrica en México en la ciudad de Lerdo, en el cual se obtienen los modelos exergéticos de los

procesos termodinámicos que se efectúan en la termoeléctrica, se hace un análisis paramétrico donde se considera la operación, regímenes operaciones reales, donde se encuentra que en el generador de vapor es en donde se pierde más exergía, aproximadamente el 53%, de los cuales el 23.64% se debe al proceso de enfriamiento de los gases de combustión a la salida. En las bombas es en donde se pierde menos exergía, 0.11%. y se determina la eficiencia exergética de esta central dando como resultado que es del 36.76% respecto al poder calorífico inferior del combustible [20]. Este estudio ayuda a tener una noción del comportamiento de la exergía, aunque la forma de obtener la energía eléctrica es diferente, pero tiene algunas similitudes y se puede usar los valores obtenidos para compararlos con los obtenidos en este trabajo.

Por otro lado existe un estudio realizado en Cuba en el 2013 específicamente en Cienfuegos, donde se evalúa la generación distribuida de esa provincia y se compara su perfil ambiental con respecto a otras fuentes de generación de energía eléctrica. Se toma como referencia la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) según la normas NC ISO 14040 [21] y se complementa con el método de evaluación por categorías de impacto: ECO-SPEED, soportado por la herramienta informática OPENLCA 2.1. Además se emplea el programa estadístico STATGRAPHICS 15 para el análisis de los datos y del paquete de programas DECISION-TOOLS5.1 para el análisis de riesgo. Por último se proponen una serie de medidas para contribuir a la disminución del consumo de los recursos y del impacto ambiental que se produce, principalmente en los centrales de generación distribuida de energía eléctrica [22].

Estos estudios forman parte importante para la elaboración de este informe ya que son estudios precedentes y con objetivos similares, pues como se pretende evaluar la generación con fuel oil en la central eléctrica de Sancti Spíritus, y su impacto en el medio ambiente, se debe integrar, los balances de masas, balances de energías, y exergías, y por consiguiente un análisis de ciclo de vida ambiental.

## **1.5 Balance de materiales**

En el mundo se realizan diagnósticos energéticos en los procesos de una instalación industrial con el objetivo de realizar un buen uso y control de la energía, para llevar esto a cabo se recurre usualmente a los balances de materia y energía de los equipos o procesos correspondientes y se obtienen rendimientos y energías disipadas que se recomiendan mejorar o recuperar [23].

La pérdida de producto tiene un impacto significativo en la viabilidad económica de una instalación, además del efecto adverso en el medio ambiente. Hay dos formas de estimar la pérdida de producto de una instalación. La primera consiste en identificar todas las fuentes de pérdidas y cuantificarlas. La segunda consiste en medir todas las corrientes de carga y restarles todas las corrientes de productos, inclusive el combustible consumido internamente. El resultado es un balance de masa o natural. La diferencia, o discrepancia entre las corrientes de cargas y los productos, constituye la pérdida. El primer método provee una estimación de las pérdidas, la cual es estadísticamente más válida que el segundo, aunque no puede determinar si se han identificado todas las fuentes de pérdidas. El segundo método considera, teóricamente, todas las pérdidas, aunque no puede cuantificar las fuentes individuales de pérdidas, e inclusive pequeñas impresiones en las estimaciones de las corrientes de carga y productos pueden originar grandes errores en la estimación de las pérdidas. Por lo tanto una combinación de ambos métodos provee el mejor medio para monitorear las pérdidas de producto [24].

El balance de la instalación se realiza sobre la base de masa. Esto evita el problema de reconciliar los volúmenes gaseosos, líquidos y sólidos, así como también el problema de disminución volumétrica, cuando se mezclan líquidos de distintas estructuras moleculares [24].

El balance de materia es un método matemático utilizado principalmente en Ingeniería Química. Se basa en la ley de conservación de la materia (la materia ni se crea ni se destruye, solo se transforma), que establece que la masa de un sistema cerrado permanece siempre constante (excluyendo, las reacciones nucleares o atómicas en las que la materia se transforma en energía según la

ecuación de Einstein  $E=mc^2$ , y la materia cuya velocidad se aproxima a la velocidad de la luz). La masa que entra en un sistema debe salir del sistema o acumularse dentro de él, así [Wiki]:

$$\text{Entradas} + \text{Producción} = \text{Salidas} \quad (1.1)$$

Los balances de materia se desarrollan comúnmente para la masa total que cruza los límites de un sistema. También pueden enfocarse a un elemento o compuesto químico. Cuando se escriben balances de materia para compuestos específicos en lugar de para la masa total del sistema, se introduce un término de producción (que equivale a lo que se genera en la reacción química menos lo que desaparece):

$$\text{Entradas} + \text{Producción} = \text{Salidas} + \text{Acumulación} \quad (1.2)$$

El término de producción puede utilizarse para describir velocidades de reacción. Los términos de producción y acumulación pueden ser tanto positivos como negativos.

En este trabajo se empleará el balance de masa como base para conformar el inventario primario para el análisis de ciclo de vida.

## 1.6 Generalidades del balance energético

El principio de la conservación de la energía para un sistema como el de la figura 1.3, sistema industrial abierto, limitado por un volumen control  $V_c$  permite escribir:

$$(energía)_e - (energía)_s = (\text{energía acumulada}) \quad (1.3)$$

Si “e” es la energía total (interna  $u$ ; cinética,  $v^2/2g_c$ ; y potencial,  $gz/g_c$ , básicamente, aunque podrían considerarse otros tipos) por unidad de masa, es decir [23]:

$$E = u + v^2/2g_c + gz/g_c \quad (1.4)$$

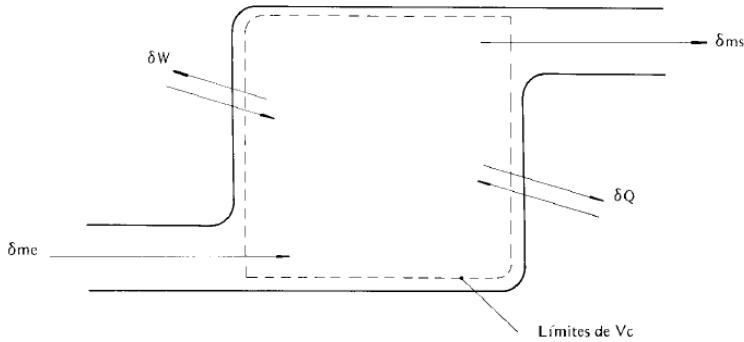


Figura 1.3. Sistema industrial abierto. Fuente: Departamento de Termodinámica y Fisicoquímica. ETSII de Zaragoza, 1987 [23].

Donde  $I/g_C$  es la constante adimensional dependiente del sistema de unidades empleado.

Si  $\delta Q$  es el calor transferido al sistema, positivo si existe absorción de calor, y si  $\delta W$  es el trabajo total realizado por el sistema, negativo si el sistema absorbe trabajo, podemos poner:

$$[(u+v^2/2g_C + gz/g_C) \delta m]_e - [(u+v^2/2g_C + gz/g_C) \delta m]_s + \delta Q - \delta W = d[u+v^2/2g_C X gz/g_C] M \quad (1.5a)$$

o bien:

$$(e\delta m)_e - (e\delta m)_s + \delta Q - \delta W = d(eM) \quad (1.5b)$$

$\delta W$  es el trabajo total realizado por el sistema, tanto extrínseco (es decir, el relacionado con el movimiento del centro de masas del sistema y/o su rotación) como intrínseco (es decir, el relacionado con las propiedades intrínsecas o termodinámicas de sistema) en este último están incluidos todos los tipos de trabajo que el sistema puede realizar, como son los trabajos en el eje, el de expansión o contracción de volumen control y el de flujo [23].

Dado que el trabajo de flujo, o trabajo necesario para introducir y sacar masa del volumen control está asociado a los términos  $-(P v \delta m)_e$  y  $(P v \delta m)_s$ , como

es bien conocido la ecuación 1.3 puede reescribirse, teniendo en cuenta que la entalpía  $h$ , vale  $u + pv$ , como:

$$[(h+v^2/2g_C + gz/g_C) \delta m]_e - [(h+v^2/2g_C + gz/g_C) \delta m]_s + \delta Q - \delta W_x = d [u+v^2/2g_C X gz/g_C) M]$$

.

(1.6)

Siendo:  $\delta W_x$  todo tipo de trabajo realizado por el sistema, excluido el necesario para introducir o sacar masa del volumen control, es decir:

$$\delta W = \delta W_x + (P v \delta m)_s - -(P v \delta m)_e \quad (1.7)$$

La expresión (6) es generalmente la más utilizada del primer principio en su aplicación a sistemas abiertos. No obstante, en muchos casos esta expresión se simplifica notablemente dependiendo de las aplicaciones particulares que se deseen. Así, la simplificación más común es la que resulta de despreciar los términos de energía cinética y potencial frente a los de entalpía, obteniendo para este caso la ecuación [23]:

$$(h\delta m)_e - (h\delta m)_s + \delta Q - \delta W_x = d(uM) \quad (1.8)$$

### **1.7 Generalidades del balance exergético**

El uso de la energía y otros recursos materiales así como el valor de los productos y servicios puede ser expresado en términos de exergía, o fracción de la energía convertible en trabajo útil. Mediante un balance exergético se puede destacar los principales procesos de transformación de exergía orientados a la obtención de valores finales energéticos y no energéticos. Se pueden calcular magnitudes de algunas eficiencias y pérdidas de exergía y determinar los principales puntos críticos para lograr la sostenibilidad en un sistema [25].

La síntesis, optimización y auditoria de los sistemas energéticos, el reparto de costes de producción según un baremo energético ó bien exergético a la hora de asignar precios a los productos finales, y otros muchos problemas en los que resulta evidente una profunda interrelación entre la Termodinámica y la Economía, han sido objeto de creciente interés en las dos últimas décadas [26]. Uno de los objetivos de la termodinámica es establecer criterios generales con que juzgar la bondad del diseño y funcionamiento de los sistemas industriales

en los que la energía juega un papel importante. Por tanto, a la hora de analizar procesos como síntesis de un producto químico, la producción de electricidad en una central térmica o la refrigeración y licuación de un gas natural entre otros, debemos plantearnos en primer lugar el interrogante de cómo discernir su eficiencia. Esto nos exige comparar el producto obtenido con el consumo o coste que ha sido necesario para obtenerlo [26].

Los análisis exergéticos a centrales termoeléctricas (CT) han sido estudiadas en la década de los ochenta por Kotas [27] él presenta los conceptos y principios de la exergía, también ha desarrollado metodologías para cuantificar las irreversibilidades generadas en los procesos que intervienen en la generación de potencia.

Moran M.J. [28] ha desarrollado una metodología para evaluar las eficiencias exergéticas de los dispositivos del sistema. También establece la diferencia entre el análisis energético y exergético, así como las diversas formas de la exergía: física, química, cinética, potencial y termomecánica. Con esta metodología, él hace análisis exergéticos a CT, especialmente en la combustión de reactivos gaseosos.

El análisis exergético realizado a la CT de Ciudad Lerdo, también se basa en las metodologías desarrolladas por Kotas [27] y Moran [29]. Se evalúan las pérdidas debidas a las irreversibilidades y la eficiencia exergética en función del PCI, criterio de M.J. Moran [28]; es decir, se consideran las pérdidas de exergía del proceso de combustión.

Tsatsaronics [30] y Ibrahim Dincer [31] obtienen eficiencias exergéticas de las CT del 64% para las condiciones de operación dadas, sin embargo, no se cuantifican las pérdidas de exergía generadas por las irreversibilidades en el proceso de combustión.

Existen otros estudios que emplean el análisis de exergía, como es el empleado por [32] en Colombia a una torre de destilación, donde se evalúan y plantean las alternativas de ahorro, disminuyendo la exergía destruida mediante la inserción de una bomba de calor, como dispositivo adicional [32].

La exergía se define como el trabajo máximo disponible que se puede obtener de un sistema que interactúa con su medio ambiente, hasta que llega a su

estado de equilibrio con el medio ambiente, o también llamado estado muerto; en las energías mecánica y eléctrica toda la energía es exergía, pero en la energía térmica no es así, esto es debido que hay una cantidad de anergía. La anergía es la fracción de energía, de la que no se puede obtener ningún trabajo útil [33].

La exergía de un sistema es la mínima cantidad de trabajo técnico necesaria para constituirlo a partir del ambiente de referencia (AR). El AR representa a aquellos recursos que la naturaleza pone a nuestra disposición en cantidades ilimitadas y a un coste de extracción nulo evaluado en trabajo técnico [26].

La componente química de la exergía de un sistema depende tanto de su composición –independiente del AR-, como de la del AR. La parte de la componente que depende del AR es lo que se define, según Kaimeyama [34] como exergía de referencia.

Cada una de las definiciones del AR, identificadas por su composición química, generarán diferentes valores de exergía de referencia y por tanto de exergía [35].

Por lo cual se deduce que la definición de exergía y la determinación de su valor, van unidos necesariamente a la definición y propiedades termodinámicas del ambiente de referencia. Por tanto, los valores de los costes exergéticos, dependientes del valor de la exergía, se verán afectados por la definición del AR. De aquí la importancia de la elección de un AR adecuado, para el análisis de un proceso [35].

Puede demostrarse que dos fluidos o sistemas son termodinámicamente equivalentes si y solo si tienen igual exergía [26]. Como representante de las clases de equivalencia es común elegir el trabajo técnico, que entra así a formar parte de la definición dada a la exergía. Pero cualquier otro tipo de elemento de una clase de equivalencia determinada es un representante de dicha clase, por lo cual según M. Lozano [26] y coincidiendo con Reistard [36] y Werper [37] donde se afirma que la exergía puede definirse también en términos de otros flujos y sistemas.

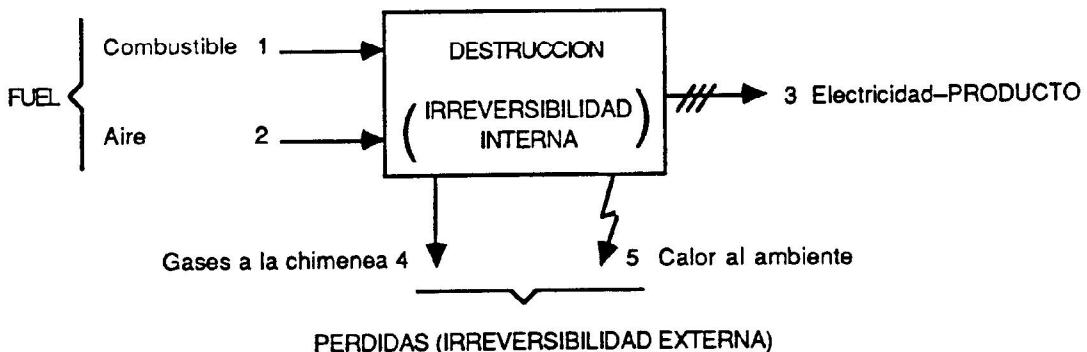


Figura 1.6. Esquema de pérdidas en un proceso de generación con Fuel Oíl [26]

La exergía es una propiedad termodinámica que permite determinar el potencial de trabajo útil de una determinada cantidad de energía que se puede alcanzar por la interacción espontánea entre un sistema y su entorno. Informa de la utilidad potencial del sistema como fuente de trabajo. Viendo que es una propiedad, hay que tener en cuenta que el valor de una propiedad no cambia a menos que cambie el estado de la materia, es decir el valor se mantiene siempre y cuando se mida en el mismo estado independientemente de la temperatura o la presión a la que se encuentre [29].

Definida de otra forma la exergía es la porción de la energía que puede ser transformada en trabajo mecánico, la parte restante, sin utilidad práctica, recibe el nombre de entropía.

La exergía determina de forma cuantitativa el valor termodinámico de cualquier recurso, y permite analizar rigurosamente el desperdicio de los recursos en las actividades de la sociedad, estableciendo pautas para su ahorro y uso eficiente. Por ejemplo, un compuesto de combustible y aire, si se quema el combustible obteniendo una mezcla de aire y productos de combustión ligeramente calientes, aunque la energía asociada al sistema sea la misma, la exergía del sistema inicial es mucho mayor, potencialmente es mucho más útil a la hora de obtener trabajo. Otro ejemplo es el agua de refrigeración de las centrales térmicas. Aunque la central cede una gran cantidad de energía al agua, esta solo eleva su temperatura unos grados por encima de la temperatura de su entorno, por tanto su utilidad potencial para obtener trabajo es prácticamente

nula o lo que es lo mismo en términos técnicos, tiene una exergía asociada baja [29].

### 1.8 Análisis de Exergía

La forma de evaluar los procesos térmicos que tienen lugar durante la generación, es mediante la implementación del análisis exergético. Este señala todas las pérdidas a través de la frontera del sistema, así como la degradación de la energía dentro de las fronteras del mismo. Granovskii 2008 señala que: “*Es generalmente aceptado que el incremento de la eficiencia en el uso de los combustibles fósiles hace a las tecnologías industriales ecológicamente más benignas y con frecuencia más seguras. Por lo tanto, el método exergético puede ayudar en la modificación racional de las tecnologías contemporáneas*” [38].

Por supuesto, el método exergético solo puede contribuir a mejorar los aspectos termodinámicos de las tecnologías contemporáneas [39].

El balance de exergía no es más que la combinación de un balance de energía y de entropía, que derivan a su vez del primer y segundo principio de la termodinámica. No es por tanto un resultado independiente, pero puede utilizarse como formulación alternativa de la segunda ley de la termodinámica [29].

Es conocido que la contabilidad exergética brinda una clara visión de la utilización y degradación de la energía [23]. El análisis exergético es importante para identificar y cuantificar, tanto el consumo de energía útil (exergía) utilizada en el desarrollo de un proceso, como las irreversibilidades del proceso (destrucción de la exergía), causadas por la generación de entropía y las pérdidas de exergía del proceso [40].

Tanto las irreversibilidades como las pérdidas de exergía, describen la verdadera pérdida de eficiencia de un sistema [41]. La reducción de la eficiencia del sistema, impacta directamente en el rendimiento de la planta, mediante el incremento del consumo de combustible [42].

El análisis exergético generalmente se aplica en la evaluación de sistemas de generación de energía. No obstante, como las leyes termodinámicas gobiernan los procesos de conversión de la energía, este método puede aplicarse a todos

los procesos donde se produzcan transformaciones de la energía. De acuerdo con Hoffman [43], la optimización termodinámica de un proceso está dirigida a minimizar la destrucción de exergía. En el caso de la generación, el objetivo es reducir la destrucción y las pérdidas de exergía del proceso.

El objetivo del análisis exergético es evaluar la eficiencia exergética de un proceso, esta se define como la relación entre la exergía útil del producto (EP) y la exergía suministrada al proceso (EF) [44]:

$$\eta_e = \frac{E_P}{E_F} \quad (1.9)$$

### **1.9 Análisis de ciclo de vida (ACV), antecedentes y utilidad**

En los últimos años de la década de los ochenta, el concepto de la “administración del ciclo de vida” llegó a convertirse en un tema estrella, era preciso obtener una herramienta fiable, con la capacidad para evitar problemas derivados de percepciones subjetivas. Surge así el “Análisis del Ciclo de Vida” (ACV), que en general se puede definir como: “una aproximación por parte de la administración de la empresa para reducir el impacto de un producto, paquete o actividad sobre la salud humana y el medio ambiente [45].

Los primeros estudios de Análisis de Ciclo de Vida datan de los años 60 y 70. Inicialmente, se limitó a simples balances de materiales y energía a lo largo del proceso. Dada la relación entre el consumo energético, de recursos materiales y las emisiones de residuos, no fue difícil evolucionar hacia el ACV actual. El primer ACV fue comisionado por la Coca Cola en 1969, para evaluar diferentes tipos de envases desde el punto de vista del consumo de recursos y generación de residuos [46].

En los años 60 los primeros trabajos se enfocaban en la demanda de energía en los sistemas productivos. Esta clase de estudios relacionados con la energía recibió mayor atención a partir de la crisis energética en los años 70. El término utilizado fue “Análisis de Perfil Ambiental y de Recursos”. Los primeros estudios de comparación ecológica de productos, que en ese entonces eran llamados ecobalance (1974, Suiza), se llevaron a cabo en Europa. Estos estudios

presentaban una metodología que evaluaba las ventajas y desventajas de los diferentes sistemas de empaque [47].

Los primeros casos de ACV desarrollados en Alemania, datan de 1984/85, y fueron establecidos para envases de bebidas y papel higiénico. En la segunda mitad de los años 80, el ACV se había convertido en una herramienta competitiva muy usada en las áreas de producción y mercadeo [48].

El primer taller de metodología de ACV fue iniciado por la Sociedad de Química y Toxicología Ambiental (SETAC) en Vermont (1990), tomó además la iniciativa para establecer reglas para el ACV aprobadas internacionalmente y de esta forma se creó el “código de práctica” en 1993 en Sessimbra (Portugal) y en mayo de 1997, el grupo 5 del comité técnico ISO/TC 207 pasó la norma ISO14040: Análisis del Ciclo de Vida, Principios y Aplicaciones, la cual fue aprobada por 60 países. El ACV es ahora la herramienta de análisis ambiental más utilizada que posee un estándar internacional [48].

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es un método que ha ganado importancia en la gestión medioambiental [7]; convirtiéndose en una herramienta invaluable como soporte para la toma de decisiones ambientales. Como herramienta, el enfoque del ciclo de vida está siendo cada vez más considerado dentro de las políticas de desarrollo sostenible; además, se está convirtiendo en parte del enfoque utilizado para conceptualizar los problemas ambientales y la forma de lidiar con ellos[8].

El ACV se utiliza tradicionalmente para evaluar los impactos ambientales de productos, servicios y procesos, a través del ciclo de vida en un enfoque “de la cuna a la tumba” [49]. También puede analizarse el ciclo de vida de diferentes etapas entre la cuna y la tumba: “de la cuna a la puerta, “de la puerta a la puerta” y de “la puerta a la tumba”. Este análisis además permite evaluar la eficiencia en el consumo de materiales y energía asociada al sistema. También permite establecer un nivel de referencia para mejorar los niveles de desempeño ambiental [50].

Dado que los procesos de generación de electricidad con grupos electrógenos fuel oil producen diferentes impactos ambientales que pueden ser locales, regionales o globales, y el efecto local incluye la emisión de particulado;

mientras que los efectos regionales incluyen la emisión de dióxido de azufre y óxidos nitrosos, debido a la combustión del combustible, contribuyendo a las lluvias ácidas. Finalmente, la emisión de CO<sub>2</sub> contribuye al cambio climático global. Por otra parte, se conoce que un mejor uso de los recursos mejora la competitividad y los beneficios de una empresa, al mismo tiempo que mejora su desempeño ambiental [17]. Por lo tanto, comprender y cuantificar las implicaciones ambientales de la generación, ayudará a esta industria en su camino hacia la sostenibilidad.

La norma existente para implantar esta herramienta es la norma ISO 14040, 2006 [21], donde se definen cuatro etapas fundamentales definición y alcance de los objetivos, inventario del ciclo de vida, evaluación de los impactos ambientales e interpretación de los resultados, según la norma se describe de la siguiente forma representada en la figura 1.4:

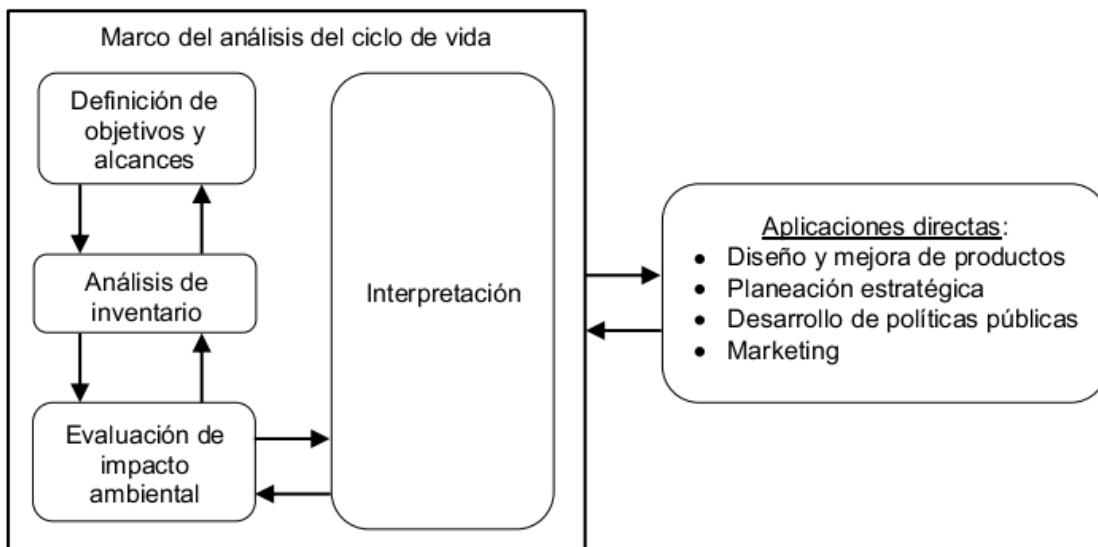


Figura 1.4 Fases de un ACV (ISO, 2006).

#### 1. Definición y alcance de los objetivos:

Esta etapa del proceso/servicio/actividad se inicia definiendo los objetivos globales del estudio, donde se establecen la finalidad del estudio, el producto implicado, la audiencia a la que se dirige, el alcance o magnitud del estudio (límites del sistema), la unidad funcional, los datos necesarios y el tipo de revisión crítica que se debe realizar [51].

## **2. Inventario del ciclo de vida:**

El análisis del inventario es una lista cuadrada de todos los flujos entrantes y salientes del sistema durante el ciclo de vida de un producto, o proceso o servicio, los cuales son atraídos del ambiente natural o bien emitidos en él, calculando los requerimientos energéticos y materiales del sistema y la eficiencia energética de sus componentes, así como las emisiones producidas en cada uno de los procesos y sistemas [51].

## **3. Evaluación de impactos ambientales:**

Según la lista del análisis de inventario, se realiza una clasificación y evaluación de los resultados del inventario, y se relacionan sus resultados con efectos ambientales observables [52].

## **4. Interpretación de resultados:**

Los resultados de la fase precedentes son evaluados juntos, en un modo congruente con los objetivos definidos para el estudio, a fin de establecer las conclusiones y recomendaciones para la toma de decisiones [53].

### **1.10 Sostenibilidad**

Desde la perspectiva de la prosperidad humana y según el Informe Brundtland de 1987, se emplea por primera vez el término de desarrollo sostenible, definido como aquel que *satisface las necesidades del presente sin comprometer las necesidades de las futuras generaciones*. Esto implica un cambio muy importante en cuanto a la idea de sustentabilidad, principalmente ecológica, y a un marco que da también énfasis al contexto económico y social del desarrollo [54].

El desarrollo sostenible de un sistema económico depende en mucho de la sostenibilidad de los recursos y esta, a su vez, depende de la eficiencia con la que son utilizados, Rosen 2003 [55]. Tal es el enlace entre la exergia y el uso de un sistema productivo lo menos afectante posible del sistema natural. Tal como expone este autor, "*Exergy methods are essential in improving efficiency, which allows society to maximize the benefits it derives from its resources while minimizing the negative impacts (such as environmental damage)*". La consideración del impacto de la exergía sobre el medio ambiente y la sostenibilidad del mismo puede ser apreciado en la Figura 1.5.

En efecto, si la eficiencia exergética es del 100% tal enfoque sugiere que el impacto ambiental es nulo y la sostenibilidad es infinita; si, por el contrario, no hay eficiencia exergética, el impacto ambiental es infinito y la sostenibilidad del recurso es nula. De lo anterior puede colegirse que existe un nivel de eficiencia exergetica para el que se genera un equilibrio entre impacto ambiental y el nivel de sostenibilidad [56].

Dada la naturaleza global de los problemas económicos y ecológicos que se pretende resolver con una reestructuración energética sostenible, se requieren cambios radicales en los patrones de producción y consumo de energía a nivel global. Además de un cambio radical en la forma en que se explotan estos recursos energéticos pues afectan el desarrollo medio ambiental sostenible. No obstante, el ritmo y los patrones concretos de este proceso en cada región o país depende de las condiciones específicas de cada caso. Los patrones de una reestructuración energética sostenible se orientan en dos direcciones básicas, con el incremento del ahorro y la eficiencia energética y en un desarrollo de las fuentes renovables de energía. [57]

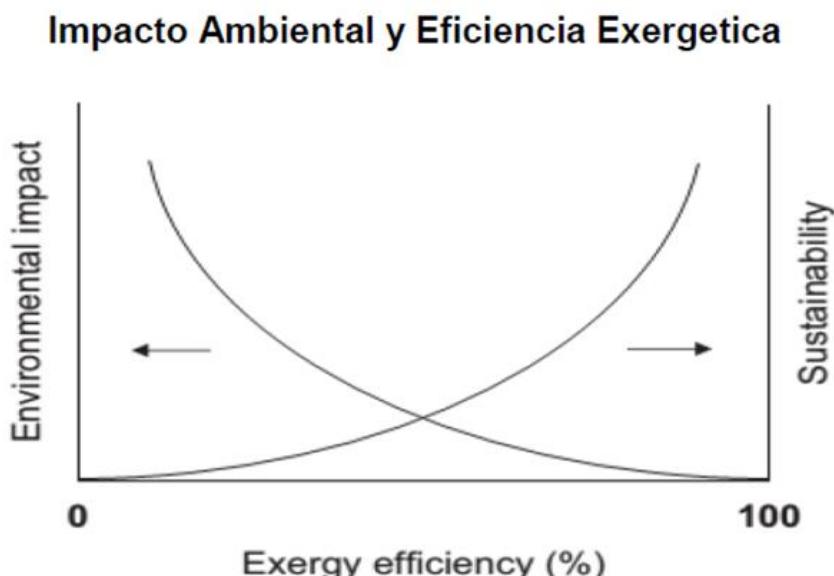


Figura 1.5. Impacto ambiental y Eficiencia Exergética Fuente: Rosen 2008.

En la actualidad existen altos niveles de contaminación causados por el hombre. La contaminación es cualquier sustancia o forma de energía que

puede provocar algún daño o desequilibrio (irreversible o no) en un Ecosistema, en el medio físico o en un ser vivo. Es siempre una alteración negativa del estado natural del medio ambiente, y por tanto, se genera como consecuencia de la actividad humana [58].

Se denomina contaminación atmosférica o contaminación ambiental a la presencia en el ambiente de cualquier agente (físico, químico y biológico), o bien una combinación de varios agentes en lugares, formas y concentraciones, tales que sean nocivos para la salud, para la seguridad y el bienestar de la población, también aquellos que puedan ser perjudiciales para la vida vegetal y animal, o que impidan el goce de las propiedades y lugares de recreación. La contaminación ambiental es también la incorporación a los cuerpos receptores de sustancias sólidas, líquidas o gaseosas o de mezclas de ellas, siempre que alteren desfavorablemente las condiciones naturales de los mismos o que puedan afectar la salud, la higiene y el bienestar del público [58].

Teniendo en cuenta lo anterior, es preciso realizar un estudio de los procesos de generación en la Central Eléctrica Fuel Oíl, el cual conlleve a evaluar cuan sostenible es la generación distribuida con este tipo de tecnología Alemana; para esto se debe emplear como herramienta el Análisis del Ciclo de Vida (ACV), y con el, analizar el impacto ambiental que tienen los productos empleados en los diferentes procesos de generación. Este análisis debe estar auxiliado por un balance de masa, un balance de energía y un análisis exergético, ya que de ellos se nutre el resultado final del estudio y el enfoque energético del mismo.

En este marco, y a los efectos del presente estudio se plantea la “sostenibilidad” del sector como la capacidad de todos los eslabones de la cadena que intervienen en la generación, desde que entran en la planta, hasta los residuos emitidos a la atmósfera después de ser utilizados, donde estos deben cumplir con los requerimientos de emisiones de gases de escape, vertimiento de residuos, emisiones de ruidos etc., todos dañinos para el ecosistema, por lo que deben mantener una dinámica en el tiempo con parámetros estables dentro de las normas pertinentes en cada caso.

Esta aproximación aquí adoptada es semejante a otras planteadas por expertos en este tipo de temáticas, donde se basa en sistemas de producción cuya principal característica es la aptitud de mantener su productividad y ser útiles a la sociedad indefinidamente.” Según estás definición, “los sistemas de producción sustentables deben reunir los siguientes requisitos: (1) Conservar los recursos productivos (por ejemplo, el suelo), (2) Preservar el medio ambiente, (3) Responder a los requerimientos sociales, (4) Ser económicamente competitivos y rentables”[59].

### **Conclusiones Parciales Capítulo I**

1. Se determinaron las herramientas a emplear para evaluar la sostenibilidad en la planta de generación distribuida de Sancti Spíritus.
2. La generación de electricidad mediante el combustible fuel oil conlleva a diferentes impactos ambientales, que pueden ser locales, regionales o globales, principalmente por la combustión del fuel oil.
3. Con un Análisis de Ciclo de Vida se puede evaluar los impactos ambientales, esta herramienta cuenta con las Normas ISO y permite la cuantificación de los impactos ambientales asociados a diferentes categorías.
4. El estudio es novedoso, ya que no se ha hecho una evaluación de la sostenibilidad en la generación con fuel en Sancti Spíritus, además la provincia tiene el mayor número de motores de tecnología MAN B&W 18V28/32S instalados en el país.

## CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS

### Introducción.

Este capítulo está encaminado a evaluar la sostenibilidad de la generación de electricidad a partir del combustible fuel oil en la provincia de Sancti Spíritus, para el análisis de la sostenibilidad se realiza primeramente un balance de masa en los procesos, de energía y exergético, seguido un análisis de ciclo de vida ambiental, hermanamientos que evalúan la sostenibilidad del proceso de generación.

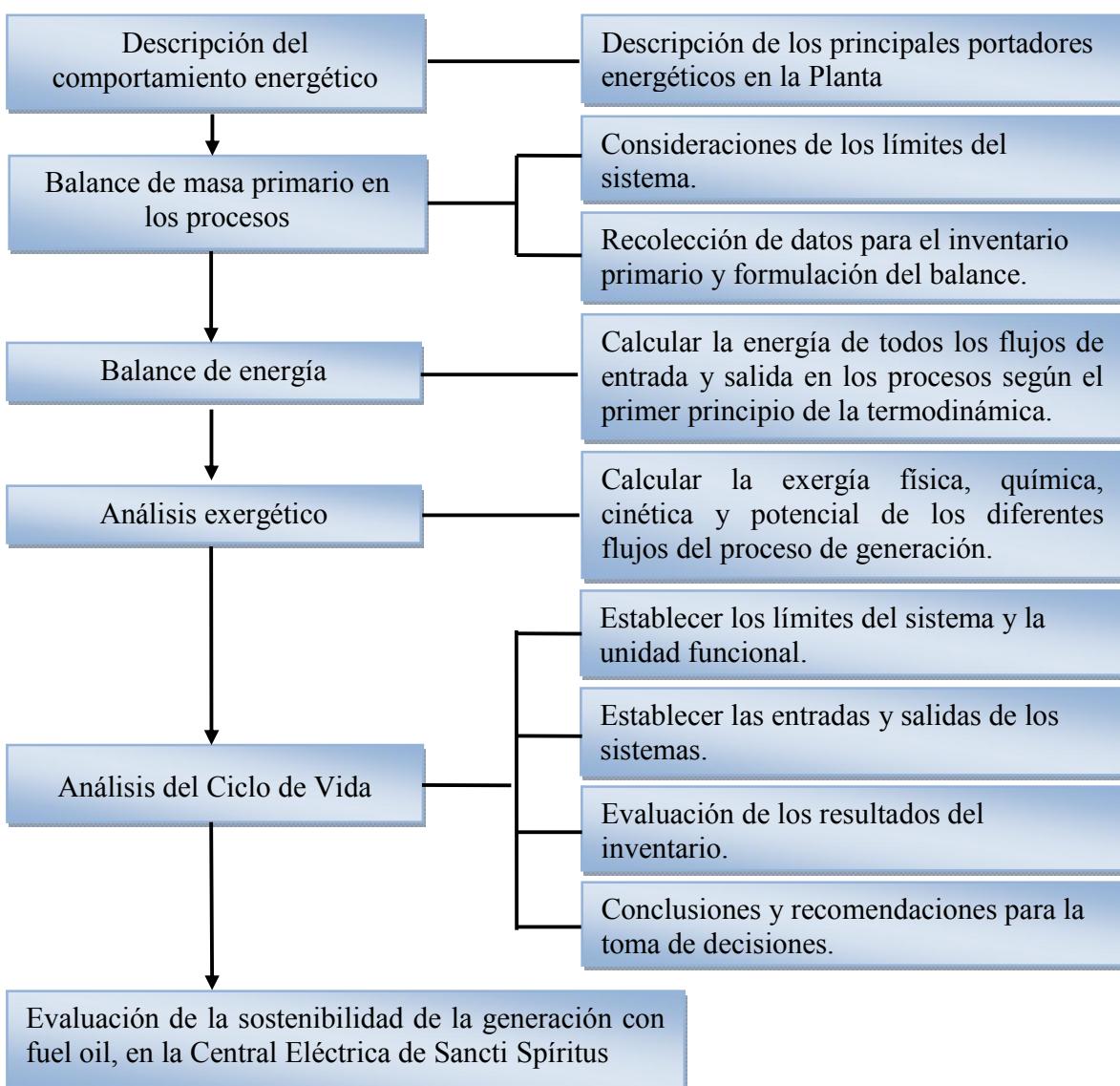


Figura 2.1. Hilo conductor para determinar la sostenibilidad de la generación en la central Eléctrica Sancti Spíritus. Fuente: El autor

## **2.1 Descripción del comportamiento energético de la planta.**

En la central existen diversos portadores energéticos dentro de los que se encuentran, el combustible fuel oil, diesel, aceite, agua y la energía eléctrica empleada en los procesos propios de la generación.

Para la realización de este informe se empleó, la base de datos llevados por el centro de control de la EMGEF (Sistema Estadístico) y la base de datos de centro de control de la UNE, (Registros de Fuel de Generación, RFG), comprendida entre los años del 2012 al 2014; se utilizan ambas bases de datos, ya que en una se encuentran los datos específicos de consumo de cada material y en otra podemos determinar de forma global las causas del comportamiento de estos datos.

Para caracterizar el comportamiento energético en la central se emplean herramientas básicas de la TGTEE, como diagrama de pareto, ya que es una herramienta utilizada para establecer prioridades, dividiendo los efectos concurrente en unos “pocos vitales” y “muchos útiles” [60], [61] y [62]. En este caso se utiliza para definir cuál de los portadores energéticos en la planta tiene un mayor peso, en el gasto total de los años escogidos para el estudio, conformando así la estructura de gastos desde el 2012 hasta el 2014.

### **2.1.2 Determinación del factor de potencia, e índice de consumo.**

Cuando se trata de cargas individuales, generalmente el factor de potencia es conocido o puede ser estimado a partir de los datos del fabricante. Si esto no es factible o si se tiene un conjunto de cargas diferentes, tanto por su naturaleza como por sus tiempos de conexión, es conveniente auxiliarse de equipos de medición [63].

El factor de potencia se puede evaluar en forma instantánea o como promedio para un intervalo de tiempo. El conocimiento periódico de valores instantáneos, sobre todo en condiciones de demanda máxima, permite determinar su comportamiento y ofrece una perspectiva para controlarlo. En instalaciones donde la carga no está sujeta a grandes variaciones durante las horas de trabajo, puede ser considerado un factor de potencia promedio [63].

Actualmente se encuentran en el mercado una gran variedad de sistemas de medición (conocidos como analizadores de redes) que permiten obtener todas

las variables que posibilitan realizar una completa valoración de cada uno de los indicadores energéticos, incluyendo el factor de potencia de un motor [63].

En la central existen equipamientos para la medición de la potencia activa, frecuencia, tensión y corriente, en cada una de las fases en los 5 motores instalados, lo cual permiten obtener automáticamente el factor de potencia instantáneo.

La generación de electricidad, es directamente proporcional al factor de potencia a que están sometidos los motores en su ciclo de trabajo ya sea diario, semanal o mensual y en gran medida al índice de consumo de combustible (*ver grafica 2.1*), es por ello que son los principales indicadores para controlar la eficiencia de la generación de electricidad.

El factor de potencia (FP) de los motores no es más que la potencia que estos generan (PG) respecto a su potencia total (PT).

$$\text{Factor Potencia (FP)} = \frac{\text{Potencia Generada (PG)}}{\text{Potencia Total (PT)}} * 100 \quad (2.1)$$

El índice de consumo (Ic) en los motores, está dado por la cantidad de gramos de combustible consumidos (fuel y diesel), entre la Generación Bruta (GB), lo que se traduce de forma general en eficiencia, siendo esta mayor, siempre que sea menor el índice de consumo y mayor el factor de potencia en los motores.

$$\text{Índice de consumo (Ic)} = \frac{C_{\text{fuel}} \times \rho_{\text{fuel}} + C_{\text{diesel}} \times \rho_{\text{diesel}}}{\text{Generación Bruta (GB)}} \quad (2.2)$$

## 2.2 Balance de masa en la Central Eléctrica Sancti Spíritus.

Para el balance de masa se cuenta con los valores de consumo de combustible (diesel y fuel), agua, aceite, la producción de lodo, de vapor entre otros flujos que intervienen en la generación, se cuenta con los valores diarios, mensuales y anuales de estos productos desde el 2012 al 2014, así como la producción de kWh generados por cada gramo de combustible consumido.

Estos datos son sacados de la estadística llevada por el centro de dirección de la empresa y se emplean para realizar los balances de masa en cada una de las etapas de la generación.

Para el balance de masa se decidió tener en cuenta todas las etapas que intervienen en el proceso de generación, desde la recepción en la planta de todas las sustancias empleadas para generar electricidad, hasta que se genera esta y se pone en el banco de transformadores.

Según las características del proceso productivo el balance se clasificó en cuatro etapas fundamentales (ver figura 2.2), estas se clasifican de la siguiente manera:

1. **Etapa 1**, Comprende la recepción, el almacenamiento y tratamiento del combustible (fuel y aceite).
2. **Etapa 2**, Los motores.
3. **Etapa 3**, Las calderas de vapor
4. **Etapa 4**, La Planta de tratamiento residual.

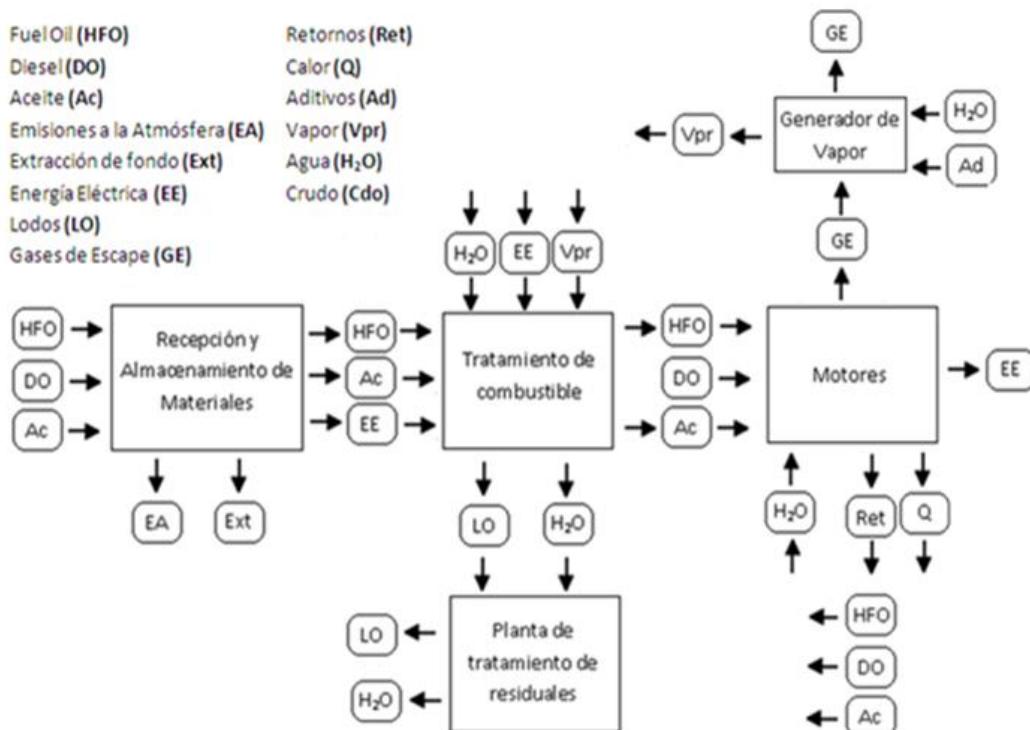


Figura 2.2. Flujos en los procesos de generación central eléctrica fuel oil.  
Fuente: El autor.

### El balance de masa en la etapa 1

En esta etapa la recepción y almacenamiento del combustible no sufre cambio, ya que el total de masa que se descarga y almacena es igual a la proporción

que pasa a ser tratada, pues las pérdidas por emisiones al medio ambiente, por evaporación y las perdidas por extracción en el fondo de los tanques de almacenamiento es casi nula si se considera para 1 MWh de generación, además, no existe como medirlas, por lo que para el balance de masa se asume que en esta parte las pérdidas se hacen cero y la masa se conserva desde la recepción hasta la entrada al tratamiento.

El balance de masa en el tratamiento del combustible fuel, se calcula por la suma de la masa de combustible que entra en la centrifuga ( $M_{fuel\ entrada}$ ), más el agua ( $M_{Agua}$ ) y el vapor ( $M_{Vapor}$ ) todo esto es igual a la suma de la masa final de combustible centrifugado ( $M_{fuel\ Final}$ ) más las pérdidas en los desperdicios producto del centrifugado ( $M_{Lodos}$ ), a continuación se muestran las tablas con los valores para 5 y 3 motores respectivamente, las entradas y salidas de este proceso y la ecuación que define el mismo, en el caso del vapor, su masa no se pierde sino que cambia de estado, de vapor saturado a líquido pero esta agua condensada es vuelta a bombear para la alimentación de las calderas cuando se realice el cálculo de balance de masa este se puede despreciar no así cuando se realice el de energía o el cálculo exergético.

La etapa final del tratamiento es el precalentamiento final del combustible antes de entrar al motor (en el booster) aquí pasa de igual manera la masa no cambia en las entradas y salidas pero para un análisis de energía o exergía si es importante considerar esta etapa, la ecuación que define esta etapa es la siguiente:

$$M_{E.Fuel} + M_{Agua} + M_{Vapor} = M_{Fuel.final} + M_{Lodos} + M_{Cond.} \quad (2.3)$$

**El balance de la etapa 2** conlleva analizar todas las entradas y salidas en el motor, donde se encuentran los flujos de aceite, fuel, aire, agua y gases de escape, se determina planteando la ecuación siguiente:

$$M_{E.fuel} + M_{E.Aceite} + M_{E.Agua} + M_{E.Aire} = M_{Gases} + M_{pérdidas} \quad (2.4)$$

La masa total de aire que alimenta el motor se calcula en dependencia del tipo y cantidad de combustible utilizado y del coeficiente de exceso de aire ( $\lambda$ )

(2.5)

$$M_{aire} = m_{Fueloil} * (1 + \lambda * m_{a_{est}})$$

Donde  $m_{a_{est}}$  es la masa de aire estequiométrico que demanda el combustible.

Para el caso de la masa en los gases de escape se calcula teniendo en cuenta que es igual, a la suma de la masa de combustible consumida en el motor, más la masa de aire total.

$$M_{gases} = M_{aire} + M_{combustible} \quad (2.6)$$

Para calcular la masa del combustible se tiene que en los datos del RFG, el consumo aparece en  $m^3$ , de ahí que se despeja y calcula la masa directamente ya que se tiene la densidad del fuel. Este valor de densidad es un promedio de los valores existentes en los datos, esta es  $967 \text{ kg/m}^3$ , por lo que para calcular la masa se despeja el volumen de la siguiente manera (ver ecuación 2.7):

$$V(m^3) = \frac{m(kg)}{\rho(kg/m^3)} \quad (2.7)$$

$$m(kg) = V(m^3) * \rho(kg/m^3) \quad (2.8)$$

**El balance de la etapa 3** se realiza analizando las entradas a los generadores de vapor, de agua, aditivo, los gases de escape y las salidas de vapor y gases de escape expulsados a la atmósfera. Se asume las calderas produciendo a su total capacidad ya que esta producción no depende absolutamente de el factor de carga del motor sino de la derivación que tenga en el dámpner (dispositivo interior en la caldera que permite que todos los gases pasen a calentar el agua o le permite derivar estos directamente a la atmósfera) los gases de los motores al 80 % de su carga tienen una temperatura adecuada para que las carderas generen a su máxima capacidad (350 a 400°C) una vez esta llega a su presión máxima de trago 8 bar, conserva su producción de vapor estable.

$$M_{Agua_E} + M_{Aditivo} + M_{Gases_E} = M_{Vapor} + M_{Gases_S} \quad (2.9)$$

**El balance de masa en la etapa 4** está dado por la cantidad total de lodo producido en la central, estos se derivan de los procesos de centrifugados de fuel y aceite, los derrames de aceites, fuel, de agua producto a salideros u otros procesos de lavado de piezas y componentes de los motores, una vez que se le realizan reparaciones o mantenimientos; todas estas entradas son igual a el lodo recuperado más el agua que es separada de este una vez que es tratada en la planta; los valores para cada caso y la ecuación del balance son los siguientes:

$$M_{lodo_E} = M_{lodo_S} + M_{Agua} \quad (2.10)$$

### 2.3 Balance de energía

Para el balance de energía en este caso se utiliza la fórmula 2.11, según el primer principio de la termodinámica, en cada etapa mencionada anteriormente, se calcula cada uno de los flujos de entrada y salida en los diferentes procesos y se establece el posterior balance empleado por Cengel, 2006 [64]:

$$En_i = m_i * C_i * T_i \quad (2.11)$$

donde En<sub>i</sub> es la energía, m es la masa, C<sub>i</sub> es el calor específico y T<sub>i</sub> es la temperatura del flujo i-ésimo.

Para el caso de la energía del combustible se calcula por la multiplicación de la masa y el poder calórico inferior de este, ecuación (2.12).

$$En_F = m_F * PCI \quad (2.12)$$

#### Balance de energía en la etapa 1 pretratamiento de combustible fuel y aceite.

Balance de energía en la Etapa 1 pretratamiento, en esta etapa se analizan principalmente los flujos cuando entran a ser tratados, a las purificadoras, aunque en la descarga existe empleo de la energía eléctrica y durante su almacenamiento en los tanques de fuel también se emplean calentadores para mantener el fuel en un estado fluido, para facilitar el bombeo hacia la planta de tratamiento y precalentamiento; en este caso esa energía no la utilizamos pues no existe valor exacto de cuál es el flujo de vapor empleado para mantener los

parámetros correctos en los tanques, y el consumo de las bombas del descargadero se pudiera sumar al proceso de tratamiento, pero falsea la verdadera energía que se emplea en este proceso; además este tampoco es un bombeo continuo al igual que cuando se centrifuga el fuel y el aceite, sino que después de descargadas las pailas no se utiliza más, hasta que se vuelve a descargar otro recipiente de fuel, diesel o aceite, por lo que se establece para el balance que estas energías se hacen cero.

Después de estas consideraciones el balance de energía en la etapa 1 queda planteado por las siguientes variables de entradas a la planta de tratamiento de combustible fuel y aceite,  $En_{F1}$ ,  $En_{ac1}$ ,  $En_{V1}$ ,  $En_{a1}$ ,  $En_{E1}$ , nombradas por energías del fuel, aceite, vapor de agua, agua y energía eléctrica, la salida están descritas por  $En_{F2}$ ,  $En_{ac2}$ ,  $En_{a2}$ ,  $En_{E1}$  y  $En_{L1}$ , las cuales se nombran energía del fuel, aceite, agua, eléctrica y el lodo producto al proceso de purificación en el cual se utiliza el 100% del agua que entra en el proceso, es bueno aclarar que el agua que sale es la condensación del vapor después que sede energía al proceso ver figura 2.4.

El balance de energía en el pretratamiento queda planteado por la siguiente fórmula ecuación:

$$En_{F1} + En_{ac1} + En_{V1} + En_{a1} + En_{E1} = En_{F2} + En_{ac2} + En_{a2} + En_{L1} \quad (2.14)$$

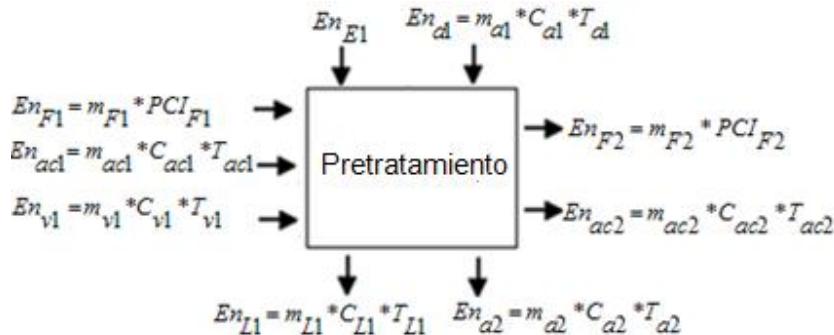


Figura 2.4. Entradas y salidas de energía en el pretratamiento.

La última parte de esta etapa está dada por el precalentamiento del combustible, en el cual se emplea un calentador pirotubular, en el que intercambia calor el vapor cediendo este al fuel, hasta llevarlo a los parámetros de viscosidad y temperatura adecuados, para un buen funcionamiento de los motores, en este caso las masas de entrada y salidas se conservan pero las energías cambian por lo cual el balance queda planteado de la siguiente manera:

$$En_{F2} + En_{EV1} + En_{E1} = En_{F2} + En_{a2} \quad (2.15)$$

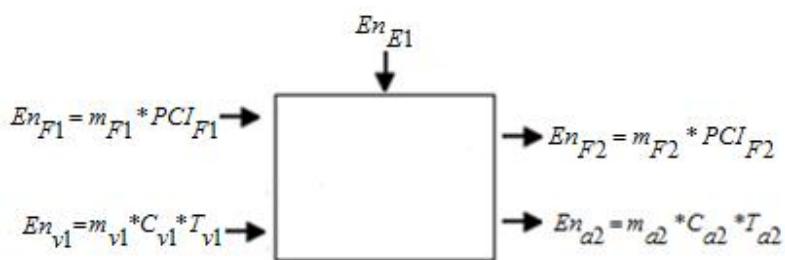


Figura 2.5. Entradas y salidas de energía en el proceso de pretratamiento (Calentamiento).

### **Balance de energía en la etapa 2 motores.**

Si se analiza la Etapa 2 motores que es donde se unen prácticamente todos los materiales y donde existe una mayor combinación de entradas y salidas de masas y energías; el balance de energía queda planteado por las siguientes variables de entradas al motor,  $En_{D1}$ ,  $En_{F3}$ ,  $En_{ac3}$ ,  $En_a3$ ,  $En_a$ ,  $En_{E2}$ , por su nombre, energía del diesel, fuel, aceite, agua, aire, y la energía eléctrica consumida respectivamente; las salidas  $En_{G1}$ ,  $En_w$ ,  $En_{ac4}$ ,  $En_{a4}$ ,  $En_{EG}$ , nombradas como energía de los gases, energía que se pierde por el calor del motor hacia el medio, agua de salida, aceite y la energía eléctrica finalmente generada. El balance se representa según la figura 2.3.

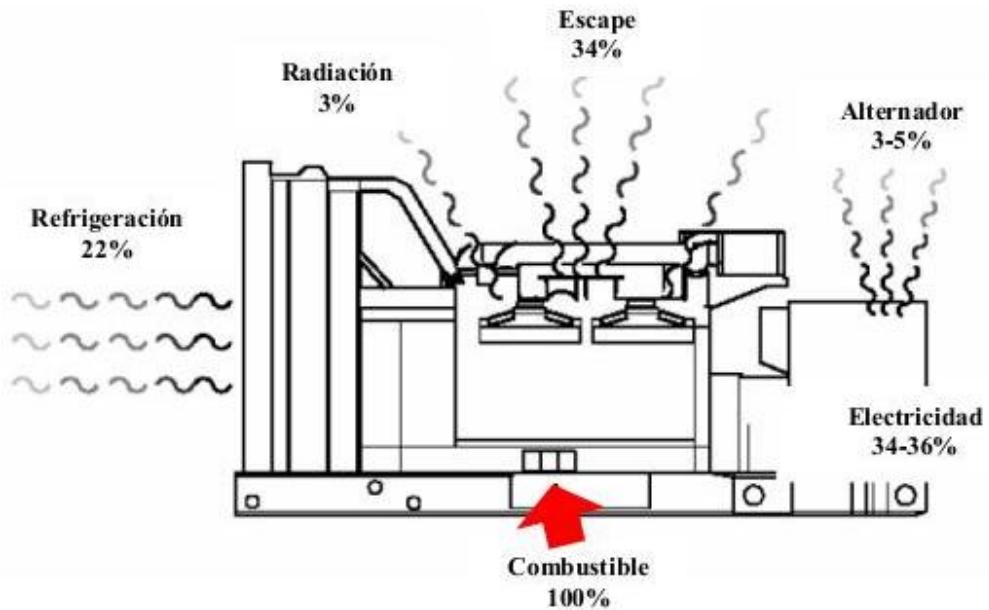


Figura 2.6. Balance energético en un grupo generador respecto del contenido energético en el combustible (CAT-APP, 2005). **Fuente:** citar

El combustible fuel oil es la fuente principal de energía que entra en los motores, y por ende la principal fuente de salida es la energía eléctrica generada, es bueno resaltar que se considera el consumo de corriente de los accesorios que tiene el motor acoplados, como los motores eléctricos refresco de toberas y motores de los enfriadores de agua (ralladores), paneles de controles automáticos y otros que demandan de corriente para su funcionamiento, las entradas y salidas de aceites, agua, aire, gases de escape, ganan y seden energía durante su intercambio en cada uno de los casos correspondientes.

De esta forma, el balance energía en los motores queda planteado por la ecuación siguiente:

$$En_{D1} + En_{F3} + En_{ac3} + En_{a3} + En_a + En_{E2} = En_{G1} + En_W + En_{ac4} + En_{a4} + En_{EG} \quad (2.13)$$

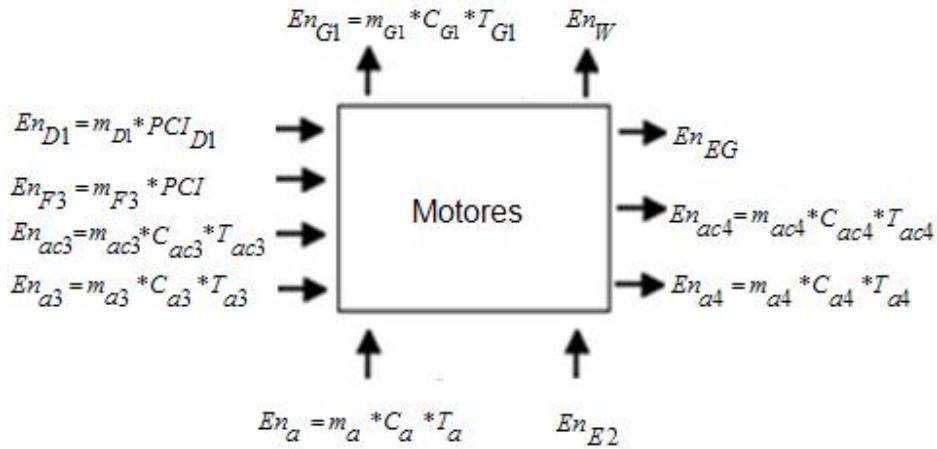


Figura 2.7. Entradas y salidas de energía en los motores.

El balance en la Etapa 3 calderas recuperadoras de vapor es un balance un poco más sencillo, pues los materiales que intervienen en la entrada son solo  $En_{a5}$ ,  $En_{E3}$ ,  $En_{G2}$ , o sea, la energía del agua, eléctrica y de los gases a la entrada del generador, de igual forma a la salida se tiene;  $En_{V0}$  y  $En_{G3}$ , las cuales se describen como la energía del vapor generado y la de los gases de escape emitidos a la atmósfera, ver figura 2.5.

La ecuación de balance por tanto queda planteada de la siguiente manera:

$$En_{a5} + En_{E3} + En_{G2} = En_{V0} + En_{G3} \quad (2.16)$$

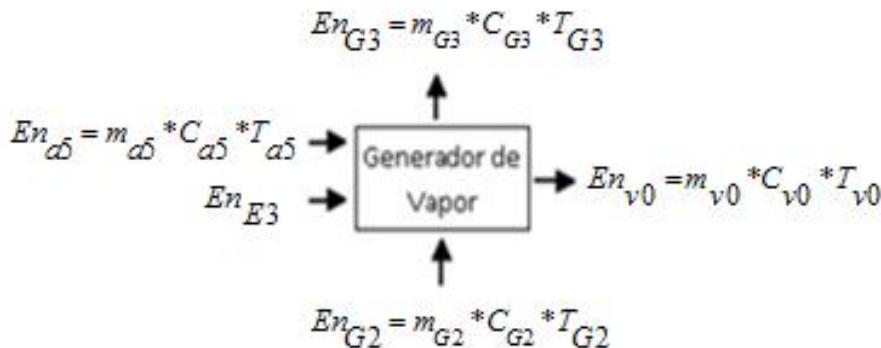


Figura 2.8. Entradas y salidas de energía en la generación de vapor.

La Etapa 4 tratamiento de residuales la cual por ser la última no deja de ser más importante al contrario, la planta de tratamiento de residuales es donde los residuos, son tratados para mitigar su vertimiento al agua, principalmente los productos que llegan son residuos de salideros, productos de lavados de piezas y los lodos del procesos de centrifugado, agua más sólidos, las energías que intervienen en este proceso se clasifican en  $En_{L2}$ ,  $En_{a6}$ ,  $En_{L3}$ , estas energías no son más que la energía de entrada del lodo y en la salida la energía del agua y la energía del lodo final, estos procesos se realizan a temperatura ambiente aunque siempre existe una temperatura más elevada producto a que los lodos salen con temperaturas de 70°C pero se mezclan con otros fluidos, y van cediendo energía y poniéndose en equilibrio con el medio ambiente, El balance queda planteado de la siguiente manera:

$$En_{L2} = En_{a6} + En_{L3} \quad (2.17)$$

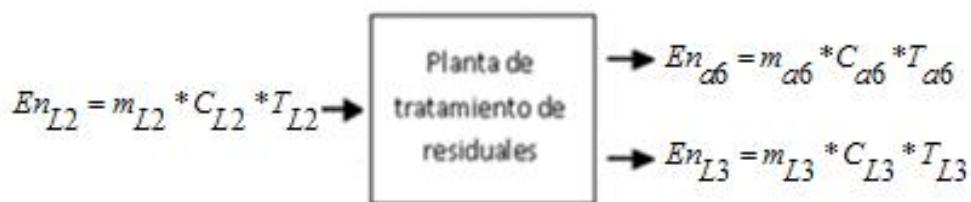


Figura 2.9. Entradas y salidas de energía en el tratamiento de residuales.

#### 2.4 Análisis de exergía.

El análisis de exergía esta basado en la segunda ley de termodinámica donde los estados de los procesos macroscópicos son irreversibles. Según Kotas [27], Szargut [65], Rosen [66] y Dincer [67], la exergía se define como la cantidad máxima de trabajo que puede producirse por un sistema, flujo de materia ó energía, cuando este se pone en equilibrio con un ambiente de la referencia.

El parámetro de eficiencia enfoca a la conversión de energía en el propio proceso, la exergía en lugar de cualquier otro recurso es el último factor limitando a las actividades de la producción, un proceso es más sustentable cuando utiliza la exergía de los recursos más eficientemente. La expresión general de eficiencia exergética, es la proporción de rendimiento de la exergía

de entrada al sistema y la exergía que se utiliza en el proceso. Por otro lado, la diferencia entre el 100% y valor actual de la eficiencia exergética, es el porcentaje de la exergía gastada por el sistema, lo cual se tiene como, la destrucción del exergía y pérdida de exergía [68].

Como bien plantea la ecuación 1.9 citada en el capítulo 1, el objetivo del análisis exergético es evaluar la eficiencia exergética de un proceso, esta se define como la relación entre la exergía aprovechada en el producto o proceso (EP) y la exergía suministrada al proceso (EF) [44]:

$$\eta_{ex} = \frac{E_P}{E_F} \quad (1.9)$$

El balance exergético de un material depende de las siguientes componentes exergéticas, exergía cinética, potencial, física, y química y se escribe según Dewulf [68], de la siguiente forma:

$$e_x = e_{xc} + e_{xp} + e_{xf} + e_{xq} \quad (2.18)$$

Antes de empezar los cálculos debe definirse un ambiente de referencia adecuado.

Definiendo una temperatura de referencia ( $T_0 = 298.15K$ ), presión ( $P_0 = 1atm$ ) y composición química del ambiente natural, es posible definir el contenido exergético universal para cada sustancia, (combustibles y no combustibles) y como consecuencia para todos los flujos. La mayoría usa el ambiente de la referencia que es el definido por el Szargut, J [65]. Las especies de la referencia deben escogerse como los productos más probables de las interacciones entre la sustancia considerada y los componentes del ambiente natural. Las especies de la referencia puede ser los componentes gaseosos atmosféricos, la disolución del agua del mar, o las presentes de los compuestos sólidos de la superficie de la tierra. La exergía del ambiente de la referencia es cero y la exergía del sistema es cero cuando está en el equilibrio con el ambiente de la referencia [68].

El valor de la energía cinética y potencial de un flujo coincide con el valor de su exergía cinética y potencial respectivamente. La exergía química de las sustancias se encuentra tabulada (Kotas [27]; Exergoecology portal [69]) ,estas se calculan de la siguiente forma:

$$e_{xc} = m \frac{C_0^2}{2} \quad (2.19)$$

$$e_{xp} = m * g_e * Z_o \quad (2.20)$$

Donde  $m$  es la masa del flujo,  $C_0$  es la velocidad del fluido respecto a la superficie de la tierra,  $Z_o$  es la altura del fluido sobre el nivel del mar y  $g_e$  es la aceleración de la gravedad (se considera constante) [68].

La exergía física se define por el total de trabajo máximo que se obtiene cuando el material se torna reversible de su estado inicial de presión  $P_i$  y temperatura  $T_i$  al estado en equilibrio con el medioambiente o sea a  $T_o$  y  $P_o$  por el proceso físico, sin cambio de la composición química, se define por la siguiente ecuación:

$$e_{xf} = (h_i - h_0) - T_0 \cdot (S_i - S_0) \quad (2.21)$$

Los términos ( $h_i - h_0$ ) y ( $S_i - S_0$ ) son las variaciones de entalpía y entropía, por mol de materia, entre  $P_0$ ,  $T_0$  y  $P_i$ ,  $T_i$ , evaluados bajo la restricción de la composición de la mezcla, si lo es, permanece constante [70]

Para la determinación de la exergía química de los hidrocarburos líquidos existe un método de cálculo, el cual emplea un coeficiente  $\beta$ , este depende de la composición química del compuesto, en este caso el fuel oil y sus componentes hidrógeno y carbono.

Este método del factor  $\beta$ , obtiene dicha exergía por la multiplicación del poder calorífico inferior y el factor  $\beta$ , este factor depende de la composición atómica de la sustancia; que para el caso del fuel está dado por los valores del hidrógeno y el carbono.

$$ex_{fuel}^0 = \beta(PCI)_{fuel} \quad (2.22)$$

Donde

$$\beta = (1 - \frac{T_0}{T_j}) \quad (2.23)$$

Como se muestra en la tabla el factor  $\beta$  tiene diferentes expresiones, en este caso se empleará la expresión para los hidrocarburos líquidos.

Tabla 2.1: Radio  $\beta$  para combustibles sólidos y líquidos. Fuente: Dewulf 2012, Comprehensive Guideline for Exergetic and Life Cycle Assessment.[68]

Solid fuels	Liquid fuels
Solid hydrocarbon	Liquid hydrocarbon
$\beta = 1.0435 + 0.0159 \frac{H}{C}$	$\beta = 1.0406 + 0.0144 \frac{H}{C}$
Solid C, H, O compounds	Liquid C, H, O compounds
$\beta = 1.0438 + 0.0158 \frac{H}{C} + 0.0813 \frac{O}{C}, \text{ for } \left[ \frac{O}{C} \leq 0.5 \right]$	$\beta = 1.0374 + 0.0159 \frac{H}{C} + 0.0567 \frac{O}{C}, \text{ for } \left[ \frac{O}{C} \leq 1 \right]$
$\beta = \frac{1.0414 + 0.0177 \frac{H}{C} - 0.3328 \frac{O}{C} \left[ 1 + 0.0537 \frac{N}{C} \leq 0.5 \right]}{1 - 0.4021 \frac{S}{C}}, \text{ for } \left[ \frac{O}{C} \leq 2 \right]$	
Solid C, H, O, N compounds	Liquid C, H, O, S compounds
$\beta = 1.0437 + 0.014 \frac{H}{C} + 0.0968 \frac{O}{C} + 0.0467 \frac{N}{C}, \text{ for } \left[ \frac{O}{C} \leq 0.5 \right]$	$\beta = 1.0407 + 0.0154 \frac{H}{C} + 0.0562 \frac{O}{C} + 0.5904 \frac{S}{C} \left( 10.175 \frac{H}{C} \right),$ $\text{for } \left[ \frac{O}{C} \leq 1 \right]$
$\beta = \frac{1.044 + 0.016 \frac{H}{C} - 0.3493 \frac{O}{C} \left[ 1 + 0.0531 \frac{N}{C} \leq 0.5 \right] + 0.0493 \frac{N}{C}}{1 - 0.4124 \frac{S}{C}}, \text{ for } \left[ \frac{O}{C} \leq 2 \right]$	
Bituminous coal, lignite, coke, peat	Liquid technical fuels
$\beta = 1.0437 + 0.1896 \frac{Z_{H2}}{Z_e} + 0.0617 \frac{Z_{O2}}{Z_e} + 0.0428 \frac{Z_{N2}}{Z_e}, \text{ for } \left[ \frac{Z_{O2}}{Z_e} \leq 0.6 \right]$	$\beta = 1.0401 + 0.01728 \frac{Z_{H2}}{Z_e} + 0.0432 \frac{Z_{O2}}{Z_e} + 0.5904 \frac{Z_s}{Z_e} \left( 1 - 2.0628 \frac{Z_t}{Z_e} \right)$
Wood	
$\beta = \frac{1.0412 + 0.216 \frac{Z_{H2}}{Z_e} - 0.2499 \frac{Z_{O2}}{Z_e} \left[ 1 + 0.7884 \frac{Z_{N2}}{Z_e} \leq 0.5 \right] + 0.045 \frac{Z_{N2}}{Z_e}}{1 - 0.3035 \frac{Z_s}{Z_e}}, \text{ for } \left[ \frac{Z_{O2}}{Z_e} \leq 2.67 \right]$	

Where H/C, O/C, N/C and S/C are atomic ratios of elements, and  $Z_{H2}$ ,  $Z_i$  are de fraction mass (expressed in %).

El factor  $\beta$  depende de la composición elemental del combustible y de sus condiciones físicas acorde con Szargut [65]

$$\beta = 1,0401 + 0,01728 \cdot \frac{Z_{H2}}{Zc} + 0,0432 \cdot \frac{Z_{O2}}{Zc} + 0,5904 \cdot \frac{Z_s}{Zc} \cdot (1 - 2,0628 \cdot \frac{Z_{H2}}{Zc}) \quad (2.24)$$

Esta fórmula se emplea siempre que  $\frac{O}{C} \leq 1$  como se puede observar en la tabla 2.1

## **2.5 Análisis del ciclo de vida.**

El objetivo del análisis del ciclo de vida, para el caso de estudio, es evaluar los impactos ambientales del proceso de generación de electricidad con fuel oil en Sancti Spíritus. Para ello se asume el enfoque de “la puerta a la puerta” [49], ya que se tiene en cuenta solamente desde la entrada de todos los materiales a la planta, hasta después que se pone 1 MW en el banco de transformadores.

### **Definición y alcance de los objetivos**

El alcance de este estudio incluye las etapas que se muestran en la figura 2.2, para el análisis se tendrá en cuenta desde la recepción de los materiales en la planta hasta que son empleados para generar electricidad, y esta puesta en el banco de transformadores.

### **Unidad funcional.**

Para el estudio se tomará como unidad funcional 1 MWh, se tiene en cuenta todos los volúmenes que entran y salen en cada proceso (fuel oil, diesel, aceite, agua, electricidad, vapor de agua, gases de escape, aire etc.) se utilizan varias muestras de días donde la generación es semejante al valor promedio anual de la carga, para un análisis más cercano a la generación habitual.

### **Objetivo.**

El objetivo del análisis del ciclo de vida, en este caso es para evaluar el impacto ambiental asociados al proceso de generación de electricidad con fuel oil en la provincia de Sancti Spíritus.

### **Inventario del ciclo de vida.**

En el análisis del inventario se encuentran presentes la recolección de datos y los procedimientos de cálculo para cuantificar las entradas y salidas pertinentes del sistema. Es válido destacar que estas entradas y salidas incluyen el uso de recursos y descargas al aire, al agua y al suelo asociados con el sistema.

Para obtener los datos de inventario en la generación fue necesario realizar balances de masa y energía para obtener los datos primarios, así como una búsqueda que recogió los datos desde el 2012 al 2014 en que los motores trabajaron al 80% de su capacidad máxima.

La información para el inventario del ciclo de vida se obtuvo analizando varios días donde la generación se encontraba dentro del rango promedio anual de explotación, promediando estos días se obtuvo los diferentes flujos de entrada y salida a cada proceso. Las emisiones de CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> y de partículas sólidas, se tomaron de los estudios realizados por la empresa CUBAENERGÍA ya que existe un contratado para que esta empresa realice un diagnóstico anualmente, donde se evalúa las emisiones de contaminantes emitidos por la generación con fuel oil.

### **Conclusiones parciales capítulo 2**

## **CAPÍTULO # 3 Evaluación de la sostenibilidad de la Central Eléctrica fuel oil de Sancti Spíritus.**

### **3.1 Descripción de la Central Eléctrica Fuel Oil Sancti Spíritus y su comportamiento energético.**

La Central Eléctrica Fuel Oil Sancti Spíritus, cuenta con una estructura que está organizada por varias áreas como se muestra en la figura 2.1, estas se pueden nombrar como:

#### **Bloque administrativo.**

En esta área es donde radican las oficinas o bloque admisnstrativo donde se encuentra la dirección, economía, calidad, recursos humanos, operación, centro de dirección, etc.

#### **Área de recepción y almacenamiento.**

En esta área se encuentran las bombas de descarga de fuel, diesel, aceite y lodos, todas duplicadas, estas son encargadas de transportar estos materiales hacia los tanques de almacenamiento, en esta área se cuenta con dos tanques de almacenamiento de fuel, dos tanques de precentrifugado de fuel, un tanque de uso diario de fuel, dos tanques de diesel, dos tanques de almacenamiento de lodos y un tanque de aceite.

#### **Unidad de bombeo y tratamiento de combustible.**

En esta área se encuentran dos centrifugas de fuel, el auto filtro de fuel, dos filtros diesel, dos bombas de fuel, dos bombas de aceite, y dos bombas diesel, todos estos elementos se encargan de purificar y transportar desde el área de almacenamiento y uso diario (tanques) hacia los motores, los fluidos consumidos durante el proceso de generación de electricidad.

#### **Taller**

En esta área es donde se realizan los mantenimientos a las partes y piezas de los motores según su ciclo de mantenimiento, el taller está equipado con bancos para calibrar inyectores, equipo para el rectificado de válvulas, asientos de válvulas y culatas, cuenta con lavadoras para la limpieza de piezas, una de lavado por ultrasonidos y otra de agua caliente, cuenta con equipos de soldar eléctrico, argón y gases; además cuenta con un taller de maquinado equipado

con todos los equipos necesario para la construcción de piezas y dispositivos necesarios en caso de averías y otros eventos.

#### **Planta de tratamiento químico de agua.**

Esta planta es la encargada de mejorar la calidad del agua (suavizar), para evitar las incrustaciones y corrosión en los motores y calderas principalmente, cuenta con un filtro de carbón activo, un filtro de retrolavado, un sistema de ablandamiento, un equipo de control de dureza, un sistema de osmosis reversa y una instalación de bombeo y aumento de la presión del agua.

#### **Planta de tratamiento de residuales.**

La generación de electricidad conlleva a que resulten diferentes tipos desechos líquidos, los cuales son transportados por tuberías y canales hasta la planta de tratamiento de residuales, estos desechos se clasifican en agua, aceites, grasas, fuel y lodos. El sistema de tratamiento tiene cuatro etapas fundamentales tres etapas de decantación y una etapa final de filtrado mecánico.

#### **Bloque de enfriamiento.**

El bloque de enfriamiento de agua de baja temperatura está compuesto por un bloque de intercambiadores de calor (ralladores), con diez ventiladores para cada motor con un circuito de agua cerrado y una válvula termostática que mantiene la temperatura de agua en los parámetros establecidos a la entrada del motor.

#### **Sala de máquinas.**

La sala de máquina es una de las partes con más equipamientos en la planta ya que en ella se encuentran los motores, generadores, calderas de vapor, centrifugas de aceite, compresores para aire de arranque e instrumentación y la sala de operación y control.

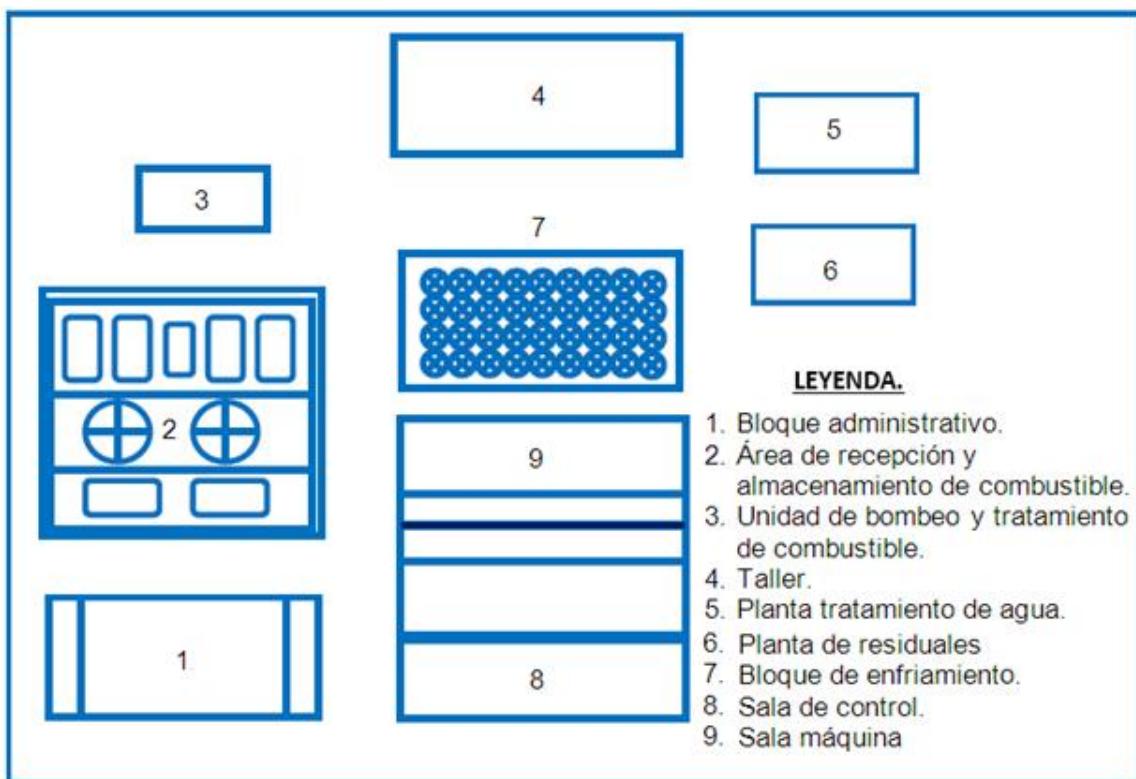


Figura 3.1 Estructura de la Central Eléctrica de Fuel Oil Sancti Spíritus. Fuente: Implementación de la Tecnología de Gestión Total y Eficiente de la Energía, en la Central Eléctrica de Fuel Oil de Sancti Spíritus [71].

El flujo de la generación de electricidad en una planta depende de las características tecnológicas de la misma, para el análisis del proceso se clasificó en las etapas siguientes:

- 1. Recepción y tratamiento del combustible**
- 2. Generación de electricidad.**
- 3. Generación de Vapor.**
- 4. Planta tratamiento de residuales.**

Para realizar el análisis de impacto ambiental real que tiene la generación con fuel oil en la provincia de Sancti Spíritus se toma como inicio todos los flujos desde que son recepción en la planta hasta que son empleados por los motores y otros procesos para la generación de electricidad.

### 3.2 Comportamiento energético en la planta.

La central eléctrica de Sancti Spíritus no cuenta con un comportamiento energético estable en los años que se tomaron para el estudio pues ha presentado problemas en algunos motores, como atraso de los mantenimientos capitales provoca que existan diferencias en la generación de los años 2012 al 2014 y así mismo en la variación del índice de consumo como se muestra en la figura 3.2.

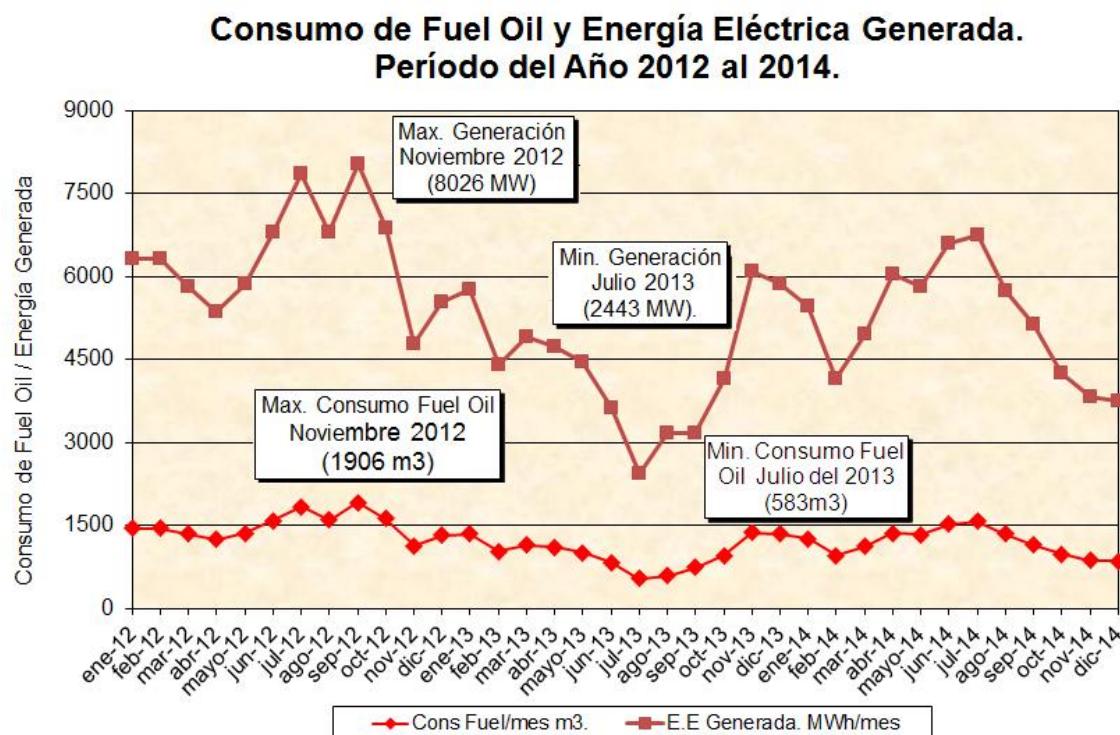


Figura 3.2 Consumo de fuel oil y energía electrica generada en el periodo 2012 al 2014 (Fuente el autor)

En la figura 3.2 se puede apreciar que la generación de electricidad varía de un año a otro y de mes a mes, esto está dado a la diversa demanda en los diferentes meses del año, al estado técnico de los motores y lo que es solicitado por el despacho nacional de carga que sea entregado en cada momento, todo esto determina el factor de carga a que ellos trabajan. El promedio del factor de carga de los motores en el periodo analizado, año 2012 al 2014 es 80%, y el

índice de consumo promedio correspondiente a este periodo es 211.04 g/kWh (*ver tabla 3.1*).

Tabla 3.1 Porciento de carga de los motores e índice de consumo de combustible en el período estudiado 2012-2014 (Fuente el autor).

Mes	Carga de los motores (%)		Índice de consumo (g/kWh)			
	Carga%	Índices	Carga%	Índices	Carga%	Índices
<b>Enero</b>	85,60	211,50	83.60	211.50	79.60	210.10
<b>Febrero</b>	86,20	211,30	84.80	211.50	78.60	209.80
<b>Marzo</b>	77,60	211,30	84.50	211.30	79.40	209.80
<b>Abril</b>	76,00	211,40	86.25	211.30	79.20	208.60
<b>Mayo</b>	75,20	211,30	80.80	211.50	81.00	209.50
<b>Junio</b>	83,75	211,90	78.20	211.50	78.80	211.50
<b>Julio</b>	82,00	211,20	73.40	211.60	77.20	212.70
<b>Agosto</b>	81,60	211,60	73.40	212.10	<b>79.80</b>	<b>213.20</b>
<b>Septiembre</b>	85,80	213,30	75.80	212.10	<b>80.60</b>	<b>213.50</b>
<b>Octubre</b>	87,60	212,50	79.80	211.10	<b>81.00</b>	<b>213.20</b>
<b>Noviembre</b>	83,75	212,50	84.40	206.50	<b>76.60</b>	<b>212.40</b>
<b>Diciembre</b>	84,80	211,40	81.80	210.60	77.60	212.20
<b>Promedio</b>	<b>85,60</b>	<b>211,50</b>	<b>80.56</b>	<b>211.05</b>	<b>79.20</b>	<b>211.38</b>
<b>Promedio General de índice de consumo en los 3 años</b>	<b>211.40</b>					
<b>Promedio General de disponibilidad 3 años</b>	<b>80.29</b>					

La tendencia en este periodo fue a disminuir el porciento mensual de carga de los motores y a su vez aumenta el índice de consumo de combustible, este comportamiento está dado a que ya para el 2014 los motores 3 y 5 estaban pendientes a mantenimientos capitales, por falta de piezas, esto llevó a que indicaciones técnicas de los especialistas de mantenimientos, se limitara su operación por debajo del 80% de su carga máxima ver *Tabla 3.2*, y que trabajaran un periodo inferior a tres horas diarias, esta carga no es la óptima según el fabricante [72] (superior al 85% ), pero es en la cual la temperatura propias del motor no representa un peligro para su estado técnico, producto al deterioro de sus partes y piezas.

Tabla 3.2 Porciento de carga de los motores e índice de consumo de combustible para el año 2014 (Fuente el autor).

Año 2014	Factor. P Promedio mensual	Motor #1	Motor #2	Motor #3	Motor #4	Motor #5	Índices de consumo
		Carga%	Carga%	Carga%	Carga%	Carga%	
Enero	79.60	81.00	76.00	81.00	77.00	83.00	210.10
Febrero	78.60	80.00	76.00	81.00	76.00	80.00	209.80
Marzo	79.40	81.00	76.00	82.00	78.00	80.00	209.80
Abril	79.20	80.00	75.00	81.00	79.00	81.00	208.60
Mayo	81.00	81.00	78.00	82.00	81.00	83.00	209.50
Junio	78.80	84.00	79.00	80.00	84.00	67.00	211.50
Julio	77.20	85.00	79.00	68.00	84.00	70.00	212.70
<b>Agosto</b>	<b>79.80</b>	<b>88.00</b>	<b>85.00</b>	<b>70.00</b>	<b>86.00</b>	<b>69.00</b>	<b>213.20</b>
<b>Septiembre</b>	<b>80.60</b>	<b>88.00</b>	<b>85.00</b>	<b>72.00</b>	<b>87.00</b>	<b>71.00</b>	<b>213.50</b>
<b>Octubre</b>	<b>81.00</b>	<b>83.00</b>	<b>83.00</b>	<b>73.00</b>	<b>84.00</b>	<b>0.00</b>	<b>213.20</b>
<b>Noviembre</b>	<b>7.60</b>	<b>82.00</b>	<b>82.00</b>	<b>71.00</b>	<b>84.00</b>	<b>64.00</b>	<b>212.40</b>
Diciembre	77.60	83.00	80.00	72.00	81.00	72.00	212.20
Promedio anual/motor		83.00	79.50	76.17	81.75	75.09	211.38

Si se analiza el año 2014 en comparación con los demás en estudio se puede observar que el índice de consumo en los meses agosto, septiembre, octubre y noviembre son unos de los mas altos del ciclo analizado, es por ello que se realizó un análisis más detallado de estos meses lo cual se representa en la tabla siguiente

Tabla 3.4. Comportamiento de los índices de combustible.

Mes	Factor Pot.	Índices	Motor indisponibles	Fuera de Servicio	Prom horas	Factor de potencia	Causa
Agosto 2014	79.80	213.20	Motor # 1	0 días	19.4	88%	
			Motor # 2	0 días	17.9	84%	
			<b>Motor # 3</b>	<b>12 días</b>	<b>2.4</b>	<b>69%</b>	
			Motor # 4	1 día	16.9	85%	
			<b>Motor # 5</b>	<b>5 días</b>	<b>2.6</b>	<b>71%</b>	
Septiembre 2014	80.60	213.50	Motor # 1	0 días	17.6	88%	
			Motor # 2	0 días	15.3	85%	
			<b>Motor # 3</b>	<b>1 día</b>	<b>2.4</b>	<b>72%</b>	
			Motor # 4	0 días	15.8	87%	
			<b>Motor # 5</b>	<b>21 días</b>	<b>2.6</b>	<b>71%</b>	
Octubre 2014	81.0	213.20	Motor # 1	0 días	16.1	83%	
			Motor # 2	0 días	13.1	83%	
			<b>Motor # 3</b>	<b>7 días</b>	<b>2.3</b>	<b>73%</b>	
			Motor # 4	0 días	13.3	84%	
			<b>Motor # 5</b>	<b>31 días</b>	<b>0</b>	<b>0%</b>	
Noviembre 2014	77.60	212.40	Motor # 1	2 días	14.3	82%	
			Motor # 2	1 día	12.6	82%	
			<b>Motor # 3</b>	<b>1 día</b>	<b>2.5</b>	<b>71%</b>	

			Motor # 4	0 días	13.0	83%	
			<b>Motor # 5</b>	<b>17 días</b>	<b>2.5</b>	<b>64%</b>	

Como se puede apreciar en la estratificación de los meses analizados de índices de consumo con mayores desviación, los motores que presentan reiterados problemas son los motores 3 y 5, los cuales en todos los casos o no trabajaron o su promedio diario de horas trabajadas no superan las 3 horas, es bueno aclarar que estos son los motores que tienen calderas acopladas, las cuales suministran vapor para los procesos en la generación. En los meses de mayor humedad y frío una sola caldera no abastece el vapor suficiente a todos los procesos de la planta, cuando pasa esto como medida de operación se limitan el empleo de vapor en algunos procesos como el centrifugado, trazas de vapor y calentadores de vapor en los tanques de almacenamiento.

Existe estudios recientes por *Castro, A* [\[\]](#), en el cual se demuestra la relación de la variabilidad del índice de consumo y la generación de vapor, esto queda demostrado también de esta forma en la tabla 3.4, pues no existe otra causa que indique que en estos meses sucedió algo que no fuera esencialmente la baja producción de vapor, por la indisposición de los motores 3 y 5.

Es conocido por el personal de operaciones y técnicos especialistas en mantenimiento que siempre que exista una limitación en la producción de vapor, los parámetros del combustible fuel oil empleado en la planta no son adecuados, ya que la viscosidad 12 cSt y la temperatura adecuada 140°C son afectadas.

Existen otras causas que deterioran el índice de consumo de combustible en los motores y que por ende conlleva a un impacto medioambiental mayor, y el cual se relaciona en los últimos meses del 2014, es el estado técnico de los motores, en estos meses el estado técnico de los motores 3 y 5 no es bueno producto de la necesidad de ejecutar un mantenimiento capital, el factor de potencia adecuado (superior al 85%), como se puede apreciar por regulaciones técnicas aprobadas por la dirección de la UNE, los motores una vez que llegan a su mantenimiento capital solo pueden trabajar un periodo de 180 horas más, a un término menor de 3 horas diarias y con una carga que no sufra sus partes

y piezas, en este caso inferior al 80%, en los meses analizados trabajaron como promedio al 70% de su carga máxima, y por último el presentar parámetros adecuados en los consumibles aire, agua, diesel, aceite, pero principalmente los parámetros del combustible fuel oil, estas tres causas que deterioran directamente el índice de consumo del combustible se unieron en los meses analizados.

Es por esta razón que se decide analizar una segunda variante, y la más crítica pero real posible de todas, pues pasa con mucha frecuencia y es cuando tres motores trabajan al 80% de su carga máxima y existe en la producción de vapor limitaciones, y por este caso se deteriora el índice de consumo de combustible visto en el último año 2014.

Se debe posteriormente analizar el impacto ambiental de ambas variantes y compararlas entre si, ya que si con solo una caldera se deteriora las propiedades fundamentalmente del combustible fuel oil, y se afecta el índice de combustible, por ende debe tener este caso un mayor impacto ambiental, ya que el producto final emitido a la atmósfera en ambos casos es diferente, es por eso que se decide analizar el ciclo de vida de estas dos variantes.

**Explicar en forma de resumen las dos variantes.**

### 3.3 Resultados del balance de masa

Para el balance de masa se tomó cada uno de las etapas definidas en el capítulo anterior, y se definió las entradas, salidas y consumos (VE,VS,VC) en cada proceso según corresponde a las variantes, 1(5 motores) y 2 (3 motores) a continuación se muestran las tablas para cada proceso y el balance de masa realizado.

Tabla 3.5 Balance de masa en el proceso de centrifugado de fuel oil para ambas variantes 5 motores (V-1) y 3 motores (V-2) al 80% (Fuente el autor).

<b>Balance de masa centrifugado de fuel oil kg/horas para el 80%, Variante 1 y Variante 2.</b>						
<b>Sustancia</b>	<b>V-1 E</b>	<b>V-1 S</b>	<b>V-1 C</b>	<b>V-2 E</b>	<b>V-2 S</b>	<b>V-2 C</b>
Fuel	3275,26	3274,26	-	2060,7	2059,7	-
Agua	9,9	-	9,9	9,9	-	9,9

Sólidos	-	1,0	-	-	1,0	-
Lodo	-	10,9	-	-	10,9	-
Vapor	480	480	-	302	302	-
E.E (kW)	22,75	-	22,75	13,65	-	13,65

Para el centrifugado de aceite es similar solo cambia este elemento y el balance tiene como resultado la siguiente tabla:

Tabla 3.6 Balance de masa en el proceso de centrifugado de aceite para ambas variantes 5 motores (V-1) y 3 motores (V-2) al 80% (Fuente el autor).

Balance de masa centrifugado de aceite kg/horas para el 80%, Variante 1 y Variante 2.						
Sustancia	V-1 E	V-1 S	V-1 C	V-2 E	V-2 S	V-2 C
Aceite	3761,00	3756,00	-	2258,82	2255,82	-
Agua	24,75	-	24,75	14,85	-	14,85
Sólidos	-	5	-	-	3,00	-
Lodo	-	29,75	-	-	17,85	-
Vapor	816	-	-	160,0	-	-
E.E (kW)	23	-	23	13,80	-	13,80

El balance de la etapa 2 conlleva analizar todas las entradas y salidas en el motor, donde se encuentran los flujos de fuel, aceite, diesel, agua, aire y gases de escape.

Tabla 3.7 Balance de masa en los 5 motores 80% (Fuente el autor).

Balance de masa Motores en kg/horas para el 80%, Variante 1 y Variante 2.						
Sustancia	V-1 E	V-1 S	V-1 C	V-2 E	V-2 S	V-2 C
Fuel	3274,26	-	3274,26	2059,71	-	2059,71
Aceite	3756,00	3740,42	15,58	2255,82	2246,47	9,35
Diesel	62,02	-	62,02	37,21	-	37,21
Agua	990000,00	989984,13	15,87	594000,00	593986,96	13,04
Aire	45512,24	45515,37	-	28629,97	-	-
Gases E	-	48786,50	-	-	30689,68	-

Para el balance de masa en las calderas se realiza las entradas y salidas en para 3 calderas y para 1 caldera, el balance queda definido por la tabla 3.8:

Tabla 3.8 Balance de masa en las 3 calderas (Variante1) y 1 caldera (Variante2) (Fuente el autor).

Balance de masa Calderas en kg/horas para el 80% la Variante 1 y Variante 2.						
Sustancia	V-1 E	V-1 S	V-1 C	V-2 E	V-2 S	V-2 C

Gases Esc	29271,90	29271,90	-	10229,89	10229,89	-
Agua	5445	-	644,178	1820,00	-	220,00
Vapor	-	4800,000	-	-	1600,00	-
E.E	5,5	-	-	5,5	-	-

El balance de masa en la planta de tratamiento de residuales queda formado por todas las entradas a dicha planta de los procesos producto a la generación de los 5 motores variante 1 y la de 3 motores variante 2, es bueno especificar que estas entradas no tienen en cuenta con los residuos de salidero, de combustibles de agua y otros elementos que van a dicha planta pues no existe como medirla e interfieren en el posterior análisis comparativo entre una variante y otra.

Tabla 3.9 Balance de masa en la planta tratamiento residual para los cinco motores en funcionamiento (Fuente el autor).

Balance de masa Planta tratamiento de residuales kg/horas Variante 1 y Variante 2				
Sustancia	V-1 E	V-1 S	V-2 E	V-2 S
Lodos	56,23	21,58	38,10	13,35
Agua	-	34,65	-	24,75
E.E (kW)	2,42	-	2,42	-

### 3.4 Resultados del balance de energía.

Tengo que explicar que esta masa es respecto a 1000 kW de generación

Energías en kW Unidad de Recepción						
Entradas	Masa A-1 (kg/h)	Masa A-2 (kg/h)	Cp (kJ/kg)	T°C	En A-1 (kW)	En A-2 (kW)
Fuel	252,79	256,51	40494,73	60	2843,54	2885,36
Diesel	4,03	4,03	42299,24	30	47,32	47,32
Aceite	1,01	1,01	31560,00	50	8,87	8,87
Agua	45,11	27,90	2445,09	25	765,96	473,72
Salidas						
Fuel	252,79	256,51	40494,73	60	2843,54	2885,36
Diesel	4,0	4,0	42299,24	30	47,32	47,32
Aceite	1,0	1,0	31560,00	50	8,87	8,87
Agua	45,1	27,9	2445,09	25	2843,54	2885,36
E.Eléc	25,25	25,62	3600,00	-	25,25	25,62

<b>Energías en kW Unidad de Pretratamiento</b>						
<b>Entradas</b>	<b>Masa A-1 (kg/h)</b>	<b>Masa A-2 (kg/h)</b>	<b>Cp (kJ/kg)</b>	<b>T °C</b>	<b>En A-1 (kW)</b>	<b>En A-2 (kW)</b>
Fuel	252,79	256,51	40494,73	85	2843,542	2885,359
Aceite	244,22	244,46	31560,00	75	2141,002	2143,109
Agua	2,25	2,68	2445,09	25	38,205	45,482
Calor	9,50	4,89	2165,83	130	5,716	2,940
E.Eléc			3600	-	2,971	3,956
<b>Salidas</b>						
Fuel	252,73	256,40	40494,73	95	2842,812	2884,142
Aceite	243,90	244,10	31560,00	85	2138,156	2140,262
Calor	7,10	3,60	2274,69	97	4,479	2,249
Lodo	2,60	3,10	22050,00	70	4,814	5,674

<b>Energías en kW Unidad de Precaleamiento</b>						
<b>Entradas</b>	<b>Masa A-1 (kg/h)</b>	<b>Masa A-2 (kg/h)</b>	<b>Cp (kJ/kg)</b>	<b>T°C</b>	<b>En A-1 (kW)</b>	<b>En A-2 (kW)</b>
Fuel	252,7	256,4	40494,73	95	2842,812	2884,142
E.Eléc	-	-	3600	-	0,429	0,449
Calor	0,182	7,271	2110,99	150	0,107	4,263
<b>Salidas</b>						
Fuel	251,2	256,4	40494,73	140	2825,282	2884,142
Calor			2274,69	97	0,115	4,594

Energías en kW Motores						
Entradas	Masa A-1(kg/h)	Masa A-2 (kg/h)	Cp (kJ/kg)	T°C	En A-1 (kW)	En A-2 (kW)
Fuel	251,17	256,40	40494,73	140	2825,28	2884,14
Aceite	243,90	244,14	31560,00	90	2138,16	2140,26
Diesel	4,03	4,03	42299,24	35	47,32	47,32
Agua	1,03	1,41	2319,91	70	46,49	63,66
Aire	2957,67	3563,98	1,012	50	41,57	50,09
E.Eléc	21,43	21,43	3600,00	-	21,43	21,43
Salidas						
Ac. retorno	242,88	243,12	31560,00	60	2129,29	2131,39
Agua Salida	1,03	1,41	2294,00	80	52,53	71,94
Gases E	3170,45	3824,41	1100,00	350	968,75	1168,57
Radiación	-	-	-	-	84,76	86,52
Refrigeración	-	-	-	-	621,56	634,51
Alternador	-	-	-	-	141,26	141,26
Generación	-	-	-	-	1000,00	1000,00

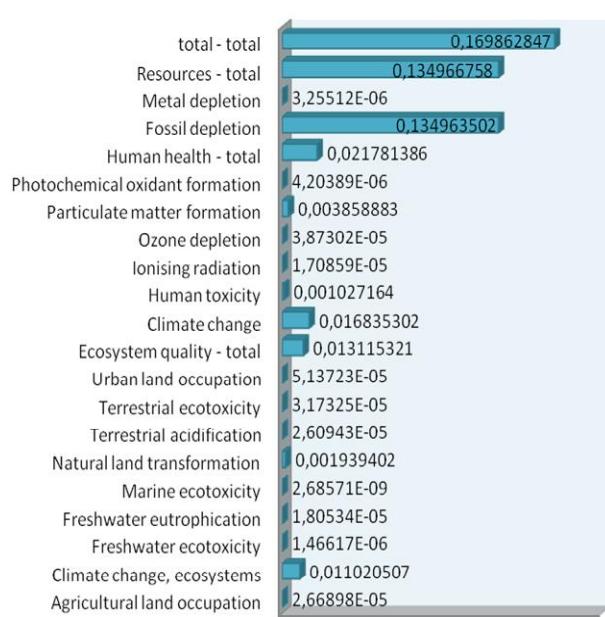
Energías en kW Planta tratamiento de Residuales						
Entradas	Masa A-1 (kg/h)	Masa A-2 (kg/h)	Cp (kJ/kg)	T°C	En A-1 (kW)	En A-2 (kW)
Lodos	2,64	3,11	31560,00	58	34,45	40,94
Aceites	1,01	1,01	31560,00	30	8,87	8,87
E.Eléc	0,16	0,26	3600		0,16	0,26
Salidas						
Combustibles recuperado	1,51	1,58	22050,00	30	9,27	9,67
Residual líquido	2,14	2,54	2294,00	25	34,05	40,54

### 3.5 Resultados del Análisis de Ciclo de vida

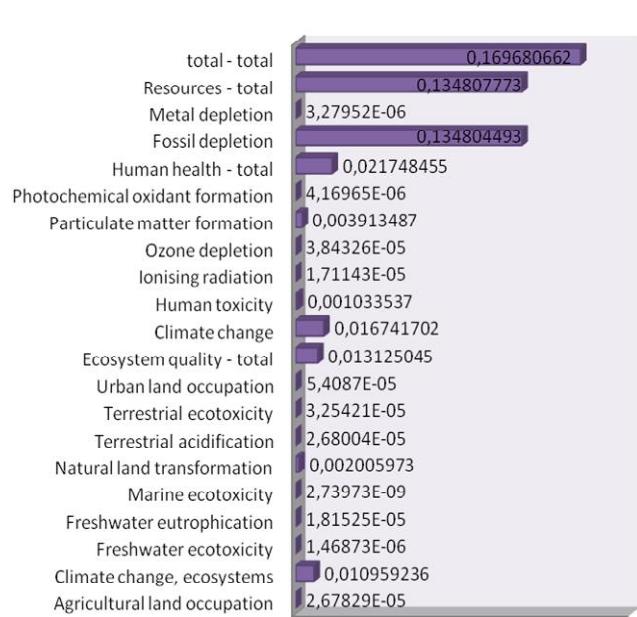
#### Recepción

Impactos ambientales en la etapa de recepción				
	Categorías de impacto Para 1 MW		Variante 1	Variante 2
Impact category ecosystem quality	Agricultural land occupation	1MW	2,669E-05	2,6783E-05
	Climate change, ecosystems	1MW	0,01102051	0,01095924
	Freshwater ecotoxicity	1MW	1,4662E-06	1,4687E-06
	Freshwater eutrophication	1MW	1,8053E-05	1,8153E-05
	Marine ecotoxicity	1MW	2,6857E-09	2,7397E-09
	Natural land transformation	1MW	0,0019394	0,00200597
	Terrestrial acidification	1MW	2,6094E-05	2,68E-05
	Terrestrial ecotoxicity	1MW	3,1732E-05	3,2542E-05
	Urban land occupation	1MW	5,1372E-05	5,4087E-05
	Ecosystem quality - total	1MW	0,01311532	0,01312505
Impact category human health	Climate change	1MW	0,0168353	0,0167417
	Human toxicity	1MW	0,00102716	0,00103354
	Ionising radiation	1MW	1,7086E-05	1,7114E-05
	Ozone depletion	1MW	3,873E-05	3,8433E-05
	Particulate matter formation	1MW	0,00385888	0,00391349
	Photochemical oxidant formation	1MW	4,2039E-06	4,1697E-06
	Human health - total	1MW	0,02178139	0,02174846
Impact category Resources	Fossil depletion	1MW	0,13496335	0,13480449
	Metal depletion	1MW	3,2551E-06	3,2795E-06
	Resources - total	1MW	0,13496676	0,13480777
Total			0,16986285	0,16968066

Impact category Total



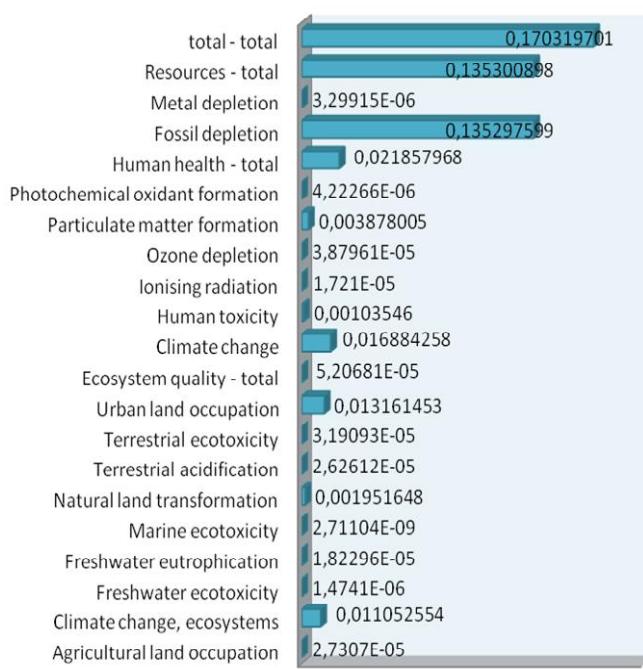
Impact category Total



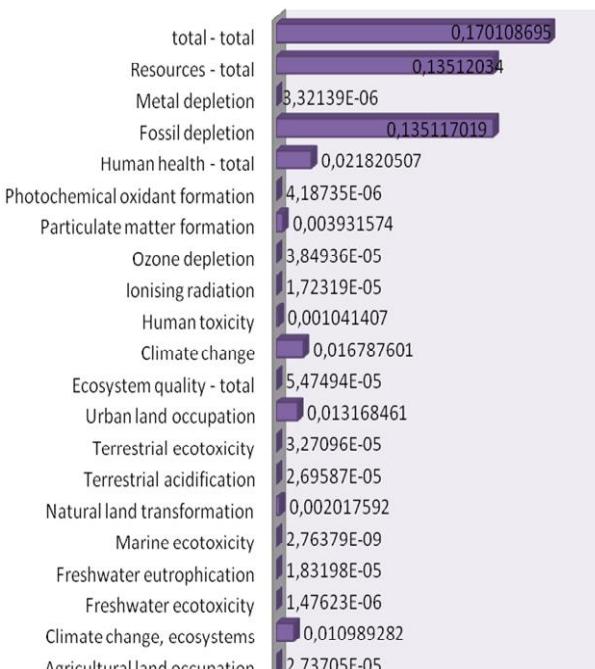
## Pretratamiento de combustible Variante 1 y Variante 2

Impactos ambientales en la etapa de Pretratamiento					
	Categorías de impacto Para 1 MW		Variante 1	Variante 2	
Impact category ecosystem quality	Agricultural land occupation	1MW	2,7307E-05	2,7371E-05	
	Climate change, ecosystems	1MW	0,01105255	0,01098928	
	Freshwater ecotoxicity	1MW	1,4741E-06	1,4762E-06	
	Freshwater eutrophication	1MW	1,823E-05	1,832E-05	
	Marine ecotoxicity	1MW	2,711E-09	2,7638E-09	
	Natural land transformation	1MW	0,00195165	0,00201759	
	Terrestrial acidification	1MW	2,6261E-05	2,6959E-05	
	Terrestrial ecotoxicity	1MW	3,1909E-05	3,271E-05	
	Urban land occupation	1MW	0,01316145	0,01316846	
	Ecosystem quality - total	1MW	5,2068E-05	5,4749E-05	
Impact category human health	Climate change	1MW	0,01688426	0,0167876	
	Human toxicity	1MW	0,00103546	0,00104141	
	Ionising radiation	1MW	1,721E-05	1,7232E-05	
	Ozone depletion	1MW	3,8796E-05	3,8494E-05	
	Particulate matter formation	1MW	0,00387801	0,00393157	
	Photochemical oxidant formation	1MW	4,2227E-06	4,1874E-06	
	Human health - total	1MW	0,02185797	0,02182051	
Impact category Resources	Fossil depletion	1MW	0,1352976	0,13511702	
	Metal depletion	1MW	3,2992E-06	3,3214E-06	
	Resources - total	1MW	0,1353009	0,13512034	
<b>Total</b>			0,1703197	0,1701087	

**Impact category Total**



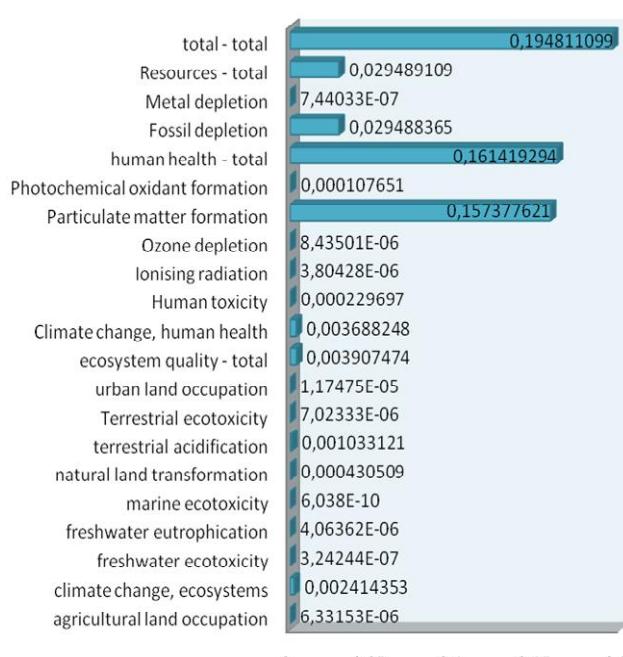
**Impact category Total**



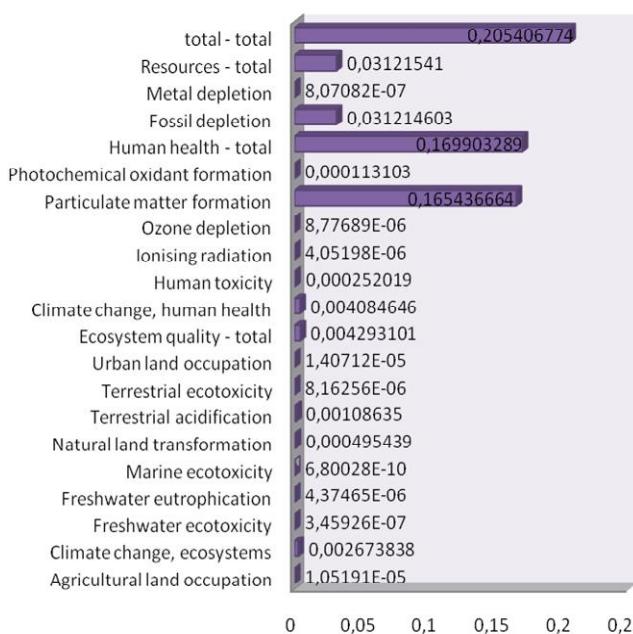
## Generación Variante 1 y Variante 2

Impactos ambientales en la etapa de Generación				
	Categorías de impacto Para 1 MW		Variante 1	Variante 2
Impact category ecosystem quality	Agricultural land occupation	1MW	6,33153E-06	1,0519E-05
	Climate change, ecosystems	1MW	0,002414353	0,00267384
	Freshwater ecotoxicity	1MW	3,24244E-07	3,4593E-07
	Freshwater eutrophication	1MW	4,06362E-06	4,3747E-06
	Marine ecotoxicity	1MW	6,038E-10	6,8003E-10
	Natural land transformation	1MW	0,000430509	0,00049544
	Terrestrial acidification	1MW	0,001033121	0,00108635
	Terrestrial ecotoxicity	1MW	7,02333E-06	8,1626E-06
	Urban land occupation	1MW	1,17475E-05	0,0042931
	Ecosystem quality - total	1MW	0,003907474	1,4071E-05
Impact category human health	Climate change	1MW	0,003688248	0,00408465
	Human toxicity	1MW	0,000229697	0,00025202
	Ionising radiation	1MW	3,80428E-06	4,052E-06
	Ozone depletion	1MW	8,43501E-06	8,7769E-06
	Particulate matter formation	1MW	0,157377621	0,16543666
	Photochemical oxi formation	1MW	0,000107651	0,0001131
	Human health - total	1MW	0,161419294	0,16990329
Impact category Resources	Fossil depletion	1MW	0,029488365	0,0312146
	Metal depletion	1MW	7,44033E-07	8,0708E-07
	Resources - total	1MW	0,029489109	0,03121541
<b>Total</b>			<b>0,194811099</b>	<b>0,205406777</b>

Impact category Total



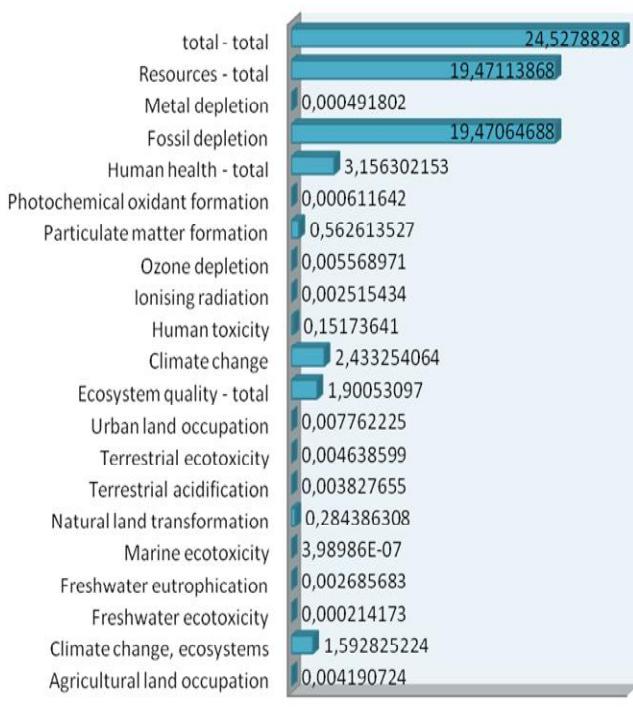
Impact category Total



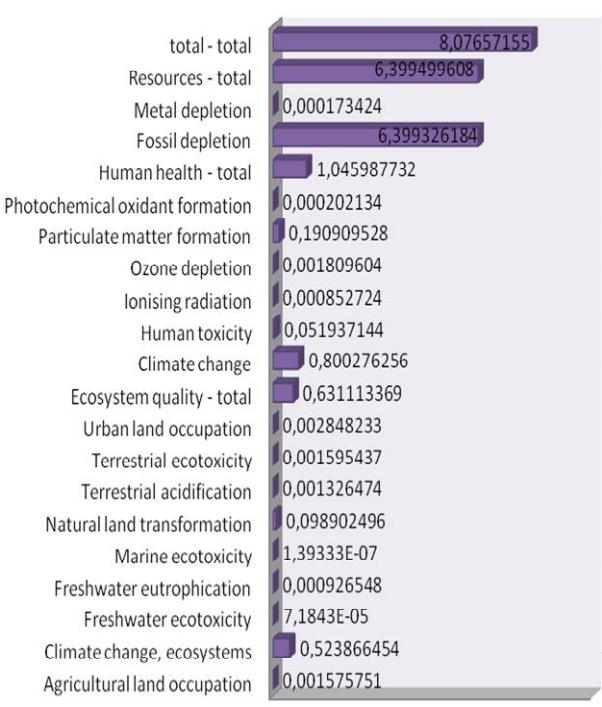
## Tratamiento de residuales Variante 1 y Variante 2

Impactos ambientales en la etapa Tratamiento Residuales				
	Categorías de impacto Para 1 MW		Variante 1	Variante 2
<b>Impact category ecosystem quality</b>	Agricultural land occupation	1MW	4,19E-03	1,58E-03
	Climate change, ecosystems	1MW	1,59282522	0,52386645
	Freshwater ecotoxicity	1MW	2,14E-04	7,18E-05
	Freshwater eutrophication	1MW	2,69E-03	9,27E-04
	Marine ecotoxicity	1MW	3,99E-07	1,39E-07
	Natural land transformation	1MW	0,28438631	0,0989025
	Terrestrial acidification	1MW	0,00382766	0,00132647
	Terrestrial ecotoxicity	1MW	4,64E-03	1,60E-03
	Urban land occupation	1MW	7,76E-03	0,00284823
	Ecosystem quality - total	1MW	1,90053097	6,31E-01
<b>Impact category human health</b>	Climate change	1MW	2,43325406	0,80027626
	Human toxicity	1MW	0,15173641	0,05193714
	Ionising radiation	1MW	2,52E-03	8,53E-04
	Ozone depletion	1MW	5,57E-03	1,81E-03
	Particulate matter formation	1MW	0,56261353	0,19090953
	Photochemical oxidant formation	1MW	0,00061164	0,00020213
	Human health - total	1MW	3,15630215	1,04598773
<b>Impact category Resources</b>	Fossil depletion	1MW	19,4706469	6,39932618
	Metal depletion	1MW	4,92E-04	1,73E-04
	Resources - total	1MW	19,4711387	6,39949961
<b>Total</b>			24,5278828	8,07657155

**Impact category Total**



**Impact category Total**



### 3.6 Análisis exergético en ambos escenarios de generación.

Es por esto que se decidió realizar al análisis exergético en los motores para ambos escenarios, donde se obtienen los siguientes resultados:

Para el agua que entra al motor con  $P_1 = 2.4$  bar,  $T_1 = 60^\circ\text{C}$  ó  $333.15\text{ K}$  y como referencia  $P_0 = 1.0$  bar y  $T_0 = 25^\circ\text{C}$  ó  $298.15\text{ K}$ , la ecuación que se usa es la emplea es la de un gas ideal según [Kotas 1995] donde  $C_p = 1.0 \text{ kJ/kgK}$  y  $R = 0.2871 \text{ kJ/kgK}$

$$\begin{aligned}\varepsilon_{fa} &= C_p (T_1 - T_0 - T_0 \cdot \ln \frac{T_1}{T_0}) + RT_0 \ln \frac{P_1}{P_0} \\ \varepsilon_{fa} &= 1,0(35 - 298,15 \ln \frac{333,15}{298,15}) + 0,2871 \times 298,15 \ln 2,4\end{aligned}$$

$$\varepsilon_{fa} = 76,84 \text{ kJ / kg}$$

La exergía química del aire se calcula de igual forma según Kotas en este caso teniendo como referencia  $(P_{00})_{O_2} = 0,2040$  bar, tomado como referencia gaseosa en consideración como componente atmosférico y de igual forma  $R = 8.3144 \text{ kJ/kmolK}$  para un gas ideal.

$$\begin{aligned}\varepsilon_q &= RT_0 \ln \frac{P_o}{P_{00}} \\ \varepsilon_q &= 9,3144 \times 298,15 \ln \frac{1}{0,2040} \\ \varepsilon_q &= 3941,60 \text{ kJ / kmol}\end{aligned}$$

Para calcular la exergía de la radiación se emplea la fórmula siguiente

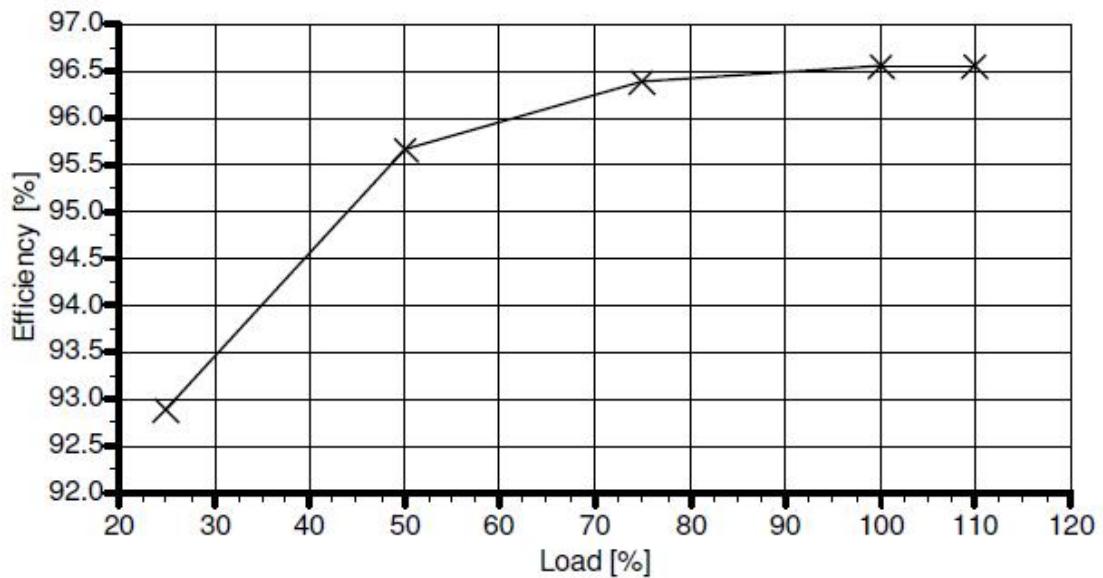
$$ex_r = \left[ 1 + \frac{1}{3} \left( \frac{T_o}{T} \right)^4 - \frac{4}{3} \left( \frac{T_o}{T} \right) \right] energy$$

$$e_{radiación} = [1 + \frac{1}{3} \left( \frac{T_o}{T} \right)^4 - \frac{4}{3} \left( \frac{T_o}{T} \right)] energía$$

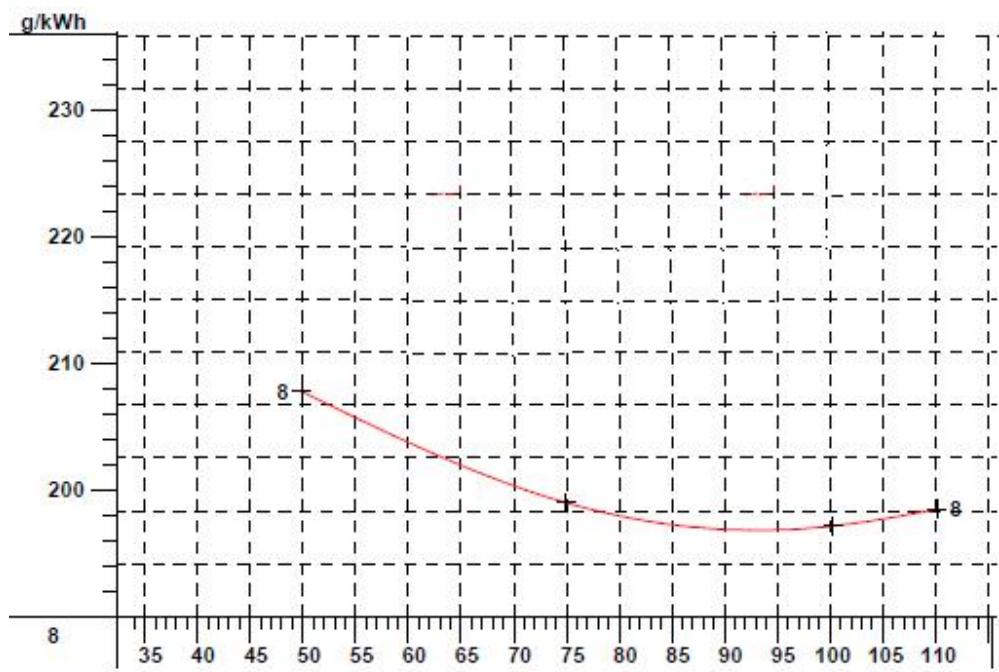
En el caso del Fuel se calcula por la fórmula

$$ex_{fuel}^0 = \beta(PCI)_{fuel}$$

$$\beta = 1,0401 + 0,01728 \cdot \frac{Z_{H2}}{Zc} + 0,0432 \cdot \frac{Z_{O2}}{Zc} + 0,5904 \cdot \frac{Z_s}{Zc} \cdot (1 - 2,0628 \cdot \frac{Z_{H2}}{Zc})$$



Fuente: Manual de usuario, Máquina Síncrona AMG 0900SK10 DSE Unión eléctrica [73]



Fuente: MAN B&W Diesel Acceptance Test Protocol Certification [72]

### **3.3 Resultados del balance de masa**

### **3.4 Resultados del balance de energía.**

### **3.5 Resultados del Análisis de Ciclo de vida**

### **3.6 Análisis exergético en ambos escenarios de generación.**

### **3.7 Evaluación de la sostenibilidad**

#### **Conclusiones**

#### **Recomendaciones**

#### **Emisiones emitidas por la generación.**

Los gases emitidos producto de la combustión en los motores tienen un impacto ambiental importante, es por eso que se toma en cuenta como parte esencial para completar el inventario.

La empresa Eléctrica de Sancti Spíritus tiene un contrato de servicio científico con la empresa CUBAENERGÍA, donde se realiza anualmente un estudio del impacto que tiene el uso del fuel oil para generar electricidad, sobre el medio ambiente y la salud humana, midiendo emisión de contaminantes atmosféricos (tales como óxidos de azufre y nitrógeno, partículas, metales pesados y gases de efecto invernadero) que provocan contaminación atmosférica a diferentes niveles.

El análisis de gases de combustión tiene como principales finalidades el control de eficiencia de sistemas de combustión y el control de emisiones gaseosas. Por medio del análisis de combustión se puede tener certeza del funcionamiento de dicho sistema y poder optimizarlo. Cuando la combustión es completa, todo el carbono (C) y el hidrógeno (H) presente en el combustible reacciona con el oxígeno (O), formando dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y vapor de agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) liberándose energía luminosa y calorífica. Finalmente todo el nitrógeno ( $\text{N}_2$ ) contenido en el aire admitido, al no participar en la combustión, es expelido por el escape tal como fue admitido [74].

La norma de emisiones vigente en Cuba (NCTS 803: 2010i) establece las Emisiones Máximas Admisibles (EMA) de contaminantes expulsados a la atmósfera por las fuentes fijas puntuales de instalaciones generadoras de

electricidad y vapor. Dicha norma estipula que todas las fuentes puntuales están obligadas a cumplir con las EMA en correspondencia con su categoría.

La Tabla 1 muestra las EMA para el tipo de fuente que corresponde al presente estudio (Grupos Electrógenos que utilizan combustible Fuel).

Tabla 1. Emisiones Máximas Admisibles para Grupos Electrógenos Fuel Oil según NC TS 803: 2010 (referidos a 15 % O<sub>2</sub> en gas seco)

Contaminante	[mg/m <sup>3</sup> ]
SO <sub>2</sub>	2500
NO <sub>x</sub>	2000

En la Tabla 2 aparecen los valores promedios de concentraciones de los cinco motores en los cuales fue medida las emisiones. Si se comparan los resultados de SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> que aparecen en la misma, con los valores de referencia de la norma cubana para las emisiones, se observa que no sobrepasan los límites establecidos en ninguno de los motores medidos, por lo que se cumple en todos los casos la norma de emisiones.

Hay que señalar que los valores que aparecen en la tabla son los promedios. Los valores obtenidos en cada una de las mediciones realizadas no sobrepasan tampoco en ningún caso los valores límites que establece la norma.

Tabla 2. Concentraciones promedio de los contaminantes en las emisiones y temperatura a la que son emitidos los gases en los grupos disponibles

Fuente	SO <sub>2</sub> [mg/Nm <sup>3</sup> *]	NO <sub>x</sub> [mg/Nm <sup>3</sup> *]	CO [mg/Nm <sup>3</sup> *]	Temperatura °C
<b>Motor 1</b>	1049.50	785.84	50.38	321.45
<b>Motor 2</b>	1095.39	892.92	42.80	328.13
<b>Motor 3</b>	1116.90	851.42	32.05	324.30
<b>Motor 4</b>	1098.46	805.36	40.44	326.55
<b>Motor 5</b>	1119.33	809.52	44.63	313.33

\*Normalizado a 0°C y corregido con el Oxígeno de referencia (15%)

En la Tabla 3 se muestran las emisiones (g/s) y el flujo normalizado a 0°C (Nm<sup>3</sup>/s).

Tabla 3. Emisiones y flujo de cada fuente

Fuente	Emisiones (g/s)			Flujo (Nm <sup>3</sup> /s)
	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	CO	
<b>Motor 1</b>	6.829	5.112	0.328	5.467
<b>Motor 2</b>	7.127	5.81	0.278	5.339
<b>Motor 3</b>	7.264	5.54	0.208	5.384
<b>Motor 4</b>	7.55	5.544	0.277	5.543
<b>Motor 5</b>	7.28	5.268	0.29	5.436

Estos tablas y datos se obtienen del estudio realizado por la empresa CUBAENERGÍA en el año 2014 [74], para la medición emplean el analizador de gases TESTO-350 XL.

### 3.1.2 Comportamiento energético en la planta

Tabla 2.1 Estructura de gastos en el período 2012-2014 (Fuente el autor).

Año 2013				Año 2014			
Actividad	Valores de Gastos	% del total de gastos	% Acum.	Actividad	Valores de Gastos	% del total de gastos	% Acum.
Combustibles y Aceite	5018000	85,44	85,44	Combustibles y Aceite	4973600	82,79	82,79
Salario	120000	2,04	87,48	Salario	117000	1,95	84,74
Mantenimiento s a equipos.	120000	2,04	89,52	Mantenimiento s a equipos.	117000	1,95	86,68
Gastos fuerza de trabajo estable.	45000	0,77	90,29	Gastos fuerza de trabajo estable.	47000	0,78	87,47
Otros Gastos	230000	3,92	94,21	Otros Gastos	112000,0	1,86	89,33
Amortización	240300	4,09	98,30	Amortización	121000	2,01	91,34
Energía	100000,0	1,70	100,00	Energía	520000	8,66	100,00
Otros Gastos	755300,0	12,86		Otros Gastos	514000,0	8,56	
Total	5873300	100,00		Total	6007600	100,00	

Año 2015			
Actividad	Valores de Gastos	% del total de gastos	% Acum.
Combustibles y Aceite	4523000	75,29	81,20
Salario	121000	2,01	83,38
Mantenimiento	119000	1,98	85,51
Gastos fuerza de trabajo estable.	50000	0,83	86,41
Otros Gastos	116000,0	1,93	88,49
Amortización	118000	1,96	90,61
Energía	523000	8,71	100,00
Otros Gastos	524000,0	9,41	
<b>Total</b>	<b>5570000,0</b>	<b>100,00</b>	

La figura 2.1 muestra el flujo del proceso de generación con las entradas y salidas de los elementos a cada proceso. Los materiales son recepcionados en el descargadero donde son bombeados a los tanques de almacenamientos, de ahí pasan a ser tratados los que conllevan este proceso como el fuel y el aceite, después estos son empleados por los motores para la generación de electricidad. Los residuos del proceso de purificación y de los vertimientos de la propia generación pasan a ser tratados en la planta de tratamiento de residuales.

### 3.2 Balance de masa en la Central Eléctrica Sancti Spíritus.

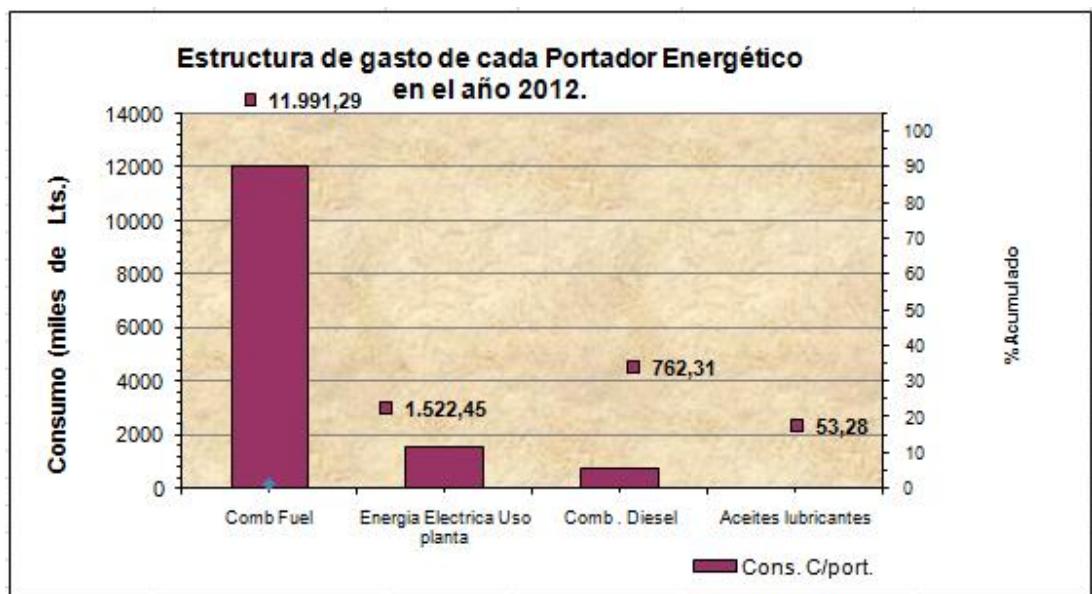
)

### 3.3 Análisis del ciclo de vida.

En este capítulo se deben poner las estructura de gastos de que tengo en el pareto, pero se deben rectificar los números con economía antes de ponerlo.



Estructura de gastos por los principales portadores energéticos



## Bibliografía

1. (ONE)., O.N.d.E., *Estadísticas Energéticas en la Revolución*. 2010. **Capítulo 1 El sector energético en Cuba.**
2. Desarrollo, P.d.l.N.U.P.E., *Informe Anual Mundial sobre el Desarrollo Humano*. 2010.
3. Agency, I.E., *World Energy Outlook* 2014: p. 1-10.
4. Castellón, S.R., *Consideraciones sobre el Sector Energético Cubano*. 2010.
5. Carpio, S.C., *SITUACIÓN Y PERSPECTIVAS DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2009.
6. FERNÁNDEZ, M.C., *GESTION DE LA INFORMACION DE LA GENERACION DISTRIBUIDA EN CUBA CON UN SISTEMA DE INFORMACION GEOGRAFICA*. 2010.
7. Löfgren, B., Tillman, A.M., Rinde, B., *Manufacturing actor's LCA*. Journal of Cleaner Production. 19 (17-18) 2025-2033, 2011., 2011.
8. Jeswani, H.K., Azapagic, A., Schepelmann, P., Ritthoff, M., *Options for broadening and deepening the LCA approaches*. Journal of Cleaner Production 18 (2) 120–127, 2010., 2010.
9. Finnveden, G., Hauschild, M.Z., Ekvall, T., Guineé, J., Heijungs, R., Hellweg, S., Koehler, A., and D. Pennington, Suh, S.,, *Recent developments in Life Cycle Assessment*. Journal of Environmental Management. . 2009. : p. 1–21.
10. autores, C.d., *Análisis de Ciclo de Vida* Unidad de Medio Ambiente (Industria Argentina Orgullo Nacional), 2011.

11. ., U.S.D.o.E. *World Consumption of Primary Energy by Energy Type and Selected Country Groups*, Energy Information Administration, U.S. Department of Energy 2006.
12. International Energy Agency, *World Energy Outlook*. 2007.
13. Colectivo de autores *Agencia Internacional de Energía (AIE) en el Resumen Ejecutivo de Word Energy Outlook (WEO)* 2009.
14. DURE Ed, ed. *Manual de Gestión Energética, Unión Eléctrica*. 2008.
15. Colectivo de autores *Situación y perspectiva de la eficiencia energética en América Latina y el Caribe. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (CEPAL)*. 2013. 302.
16. (UNE), U.E., *Informe de Balance de la Revolución Energética*. 2009.
17. Strazza, C., Del Borghi, A., Gallo, M., Del Borghi, M., *Resource productivity enhancement as means for promoting cleaner production. analysis of co-incineration in cement plants through a life cycle approach*. Journal of Cleaner Production. 19 (14) 1615 -1621, 2011., 2011.
18. Norma Cubana., T., *Calidad del aire – Emisiones máximas admisibles de contaminantes a la atmósfera en fuentes fijas puntuales de instalaciones generadoras de electricidad y vapor*. 2010.
19. Cubaenergía, *Propuesta de Norma Cubana: Calidad del aire. Metodología para modelar las afectaciones de la calidad del aire a escala local debido a las emisiones de contaminantes atmosféricos desde fuentes fijas*. 2010.
20. R. Lugo., M.S., J.M. Zamora., A.Torres., M. Toledo.,, *Análisis exergético de una central termoeléctrica*. Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica. MÉXICO., 2008. **Científica Vol. 13** p. 17-25.
21. Standardization., I.O.f., *ISO 14040:2006 Environmental management – life cycle assessment – principles and framework*. International Organization for Standardization, 2006. 2006.
22. Berlan Rodríguez Pérez, M.F.R., Nelson Fernández Ocampo, *Análisis del ciclo de vida de la generación distribuida en Cienfuegos*. 2014.
23. A Valero, M.A.L., . *Los balances de entropía exergía y energía libre*. 1987: p. 2-5.
24. Brian Tyres, N.F., Guía ARPEL, *IMPLEMENTACIÓN DE PROGRAMAS DE GESTIÓN DE ENERGÍA EN LA INDUSTRIA DEL PETRÓLEO Y EL GAS*. Junio del 1999.
25. Pablo Roque Días *Convención Internacional Ciencia, Tecnología y Sostenibilidad, Capitolio Nacional, Habana Cuba*. 2003.
26. M. A Lozano., A.V., J. Guallar.,, *Teoría del coste exergético I conceptos básicos* in *Dpto. Ingeniería Mecánica* 1989, Universidad de Zaragoza: Zaragoza.
27. Kotas, T.J., "The exergy method of thermal plant analysis". 1995.
28. Sciubba, M.J.M.E., *Exergy Analysis: Principles and Practice*". *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 1994. **116**: p. 285-290.
29. Moran M.J. y Shapiro H.N. *Ánalisis exergético. Fundamentos de termodinámica técnica*. . 1999.
30. G.Tsatsaronis, L.L., J. Pisa, *Exergy costing in exergoeconomics*". *Journal of Energy Resources Technology. Transactions of ASME*. . 1999. **121**, N1.
31. Al-Muslim;, I.-D.H., *Thermodynamic analysis of reheat cycle steam power plant*. International Journal of Energy Research, 2001. **25**: p. 727-739.

32. Diana Arroyave, W.S., Carolina Ospina, Maribel González, *ANÁLISIS ENERGÉTICO Y EXERGÉTICO DE UNA TORRE DE DESTILACIÓN*. 2004: p. 1-10.
33. Lugo, R.S., M.;Zamora, J. M.;Torres, A.;Toledo, *Alálisis exergético de una central termoeléctrica*. Núm 1, 2009. **Volumen 13**: p. 17-25.
34. Kameyama, H.Y., K; Yamauchi, S; ande Fueki, K, *Evaluation of reference exergies for the elements*. Applied Energy 11 1982: p. 69-83.
35. Jesús Guallar, A.V., *Exergía y Ambiente de Referencia*. 1990.
36. Reistad, G.M., "Availability: Concepts and Applications", 1970, Wisconsin.
37. Wepfer. W. J, *Application of the second law to the analysis and design of energy systems*. , 1979, Wisconsin: Madison.
38. Granovskii, M., Dincer, I., Rosen, M.A., *Exergy and industrial ecology: an application to an integrated energy system*. Int J Exergy. 2008.: p. 52-63.
39. YUNUS A. ÇENGEL, M.A.B., *TERMODINÁMICA 7ma EDICIÓN*. 2012.
40. Gutiérrez, A.S., *OPTIMIZACIÓN DE LA CALCINACIÓN DE CALIZAS EN HORNOS DE CUBA VERTICAL NORMAL*, in *FACULTAD DE INGENIERÍA. CENTRO DE ESTUDIOS DE ENERGÍA Y MEDIOAMBIENTE2013*, UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS: Cuba. p. 106pp.
41. Kelly, S., Tsatsaronis, G., Morosuk, T. Energy, , *Advanced exergetic analysis: approaches for splitting the exergy destruction into endogenous and exogenous parts*. 2009.: p. 384-391.
42. Verda, V., Serra, L., Valero, A. , *The effects of the control system on the thermoeconomic diagnosis of a power plant*. 2004.: p. 331-359.,
43. Hoffmann, K.H., Andresen, B., Salamon, P., 3618-3621, 1989., *Measures of dissipation*. Physical Review A. 1989.: p. 3618-3621.
44. Tsatsaronis, G., *Definitions and nomenclature in exergy analysis and exergoeconomics*. 2007.: p. 249-253.
45. Guineé, J.B., Heijungs, R., Huppes, G., Zamagni, A., Masoni, P., Buonamici, R., Ekvall, T.,Rydberg, T., *Life cycle assessment: Past, present and future*. . 2011.
46. INOVA, *Análisis del Ciclo de Vida*. 1997.
47. ALONSO, Y., *Evaluación del Impacto Ambiental de la producción de Rebajo Guante Hidrofugado mediante la utilización del Análisis de Ciclo de Vida*. 2009.
48. COMPANIONI, D., *Análisis de Ciclo de Vida en la empresa azucarera "Ecuador"*. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas. 2009.
49. Finnveden, G., Hauschild, M.Z., Ekvall, T., Guineé, J., Heijungs, R., Hellweg, S., Koehler, A., Pennington, D., *Recent developments in Life Cycle Assessment*. Journal of Environmental Management. 91 (1) 1–21, 2009. , 2009.
50. Huntzinger, D.N., Eatmon, T.D., *A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies*. Journal of Cleaner Production. 17 (7) 668–675, 2009. , 2009.
51. ISO, *Life Cycle Inventory LCI; Norma ISO 14041* 1999.
52. ISO, *Life Cycle Impact Assessment- LCIA, Norma ISO 14042*. 1999.
53. ISO, *Life Cycle Interpretations Result, Norma ISO 14043*. 1999.
54. Brundtland, D.G.H., *Informe Our Common Future: Brundtland Report* .20 March 1987. . 20 March 1987. ONU.

55. Rosen, M.A., Dincer, I., *Thermoeconomic analysis of power plants: an application to a coal-fired electrical generating station*. Energy Conversion and Management ? 2003: p. 2743–2761.
56. Gillermo David Hincapié Vélez, E.A.H.G., *Una propuesta de solución a la paradoja verde desde el punto de vista de la exergía*. 2014: p. 202-209.
57. autores, C.d., *Sostenibilidad Energética*. 2011.
58. autores, C.d., *Contaminación Atmosférica*. 2011.
59. Martina Chidiak, R.R., Cecilia Filipello, Verónica Gutman, Guillermo Rozenwurcel, y Marcia Affranchino., *SOSTENIBILIDAD DE BIOCOMBUSTIBLES E INDICADORES GBEP: UN ANÁLISIS DE SU RELEVANCIA Y APLICABILIDAD EN ARGENTINA* 2012: p. 24-30.
60. Aiteco, C., *Diagrama de Pareto*. 2010.
61. Calidad, H.d., *Sociedad Latinoamericana para la Calidad*. 2000: p. p. 1-4.
62. Juran, J.M.B.G., A., , *Manual de Calidad de Juran*. Quinta. ed. 2001. Vol. III.
63. Percy Viego Felipe, M.d.a.T., Ignacio Pérez Abril, arturo Padrón Padrón, Leonardo Casas Fernández,, *Temas Especiales de Sistemas Eléctricos Industriales*. 2006.
64. Cengel, Y.A., Boles, M.A.,McGraw-Hill,, *Thermodynamics: An Engineering Approach*, fifth ed.,McGraw-Hill,. 2006.
65. Szargut, J.M., D.R.; Steward, F.R., *Exergy analysis of thermal, chmical, and metallurgical processes*. 1988.
66. Rosen, M.A., *Allocating carbon dioxide missions from cogeneration systems: descriptions of selected autput-based methods*. Journal of Cleaner Production 16, 2008: p. 171-177.
67. I, D., *Exergy as the confluence of energy, envionment and sustainable development*. Journal 1, 2001: p. 3-13.
68. Dewulf, Y.C.L.E.R.D.J., *Comprehensive Guidelinefor Exergetic and Life Cycle Assessment*. 2012: p. 20-37.
69. Exergoecology portal, *Exergoecology portal*, . 2013.
70. M. A Lozano, A.V., *Determinación de la exergía para sustancias de interés industrial*, in *Departamento de Termodinámica y Fisicoquímica*1985, Universidad de Zaragoza.
71. Esquivel, J.R., *Implementación de la Tecnología de Gestión Total y Eficiente de la Energía, en la Central Eléctrica de Fuel Oil de Sancti Spíritus*, in *Centro de Estudio de Ingeniería y Procesos (CEPI)*.2010, Universidad José Martí Pérez de Sancti Spíritus.
72. Diesel, M.B.W., *Acceptance Test Protocol*. 2006.
73. Unión, E., *Máquina Sincrónica AMG 0900SK10 DSE* 2006.
74. Dra. Leonor Turtós Carbonell, M.I.E.M.R., MSc. Ing. Diosdado Alonso García, MSc. Ing. Ernesto Paz Ortega, Lic. Jorge Alvarado Cartaya, Lic. José Alejandro Rodríguez Zas, Ing. Yasser Fonseca Rodríguez, Ing. Arturo Martínez Pulido, *EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN (EMISIONES Y MODELACIÓN) DE CONTAMINANTES EMITIDOS POR GRUPOS ELECTRÓGENOS FUEL DE SANCTI SPÍRITUS*. 2014.

---

<sup>i</sup> NC 93-02-202/1987NORMA CUBANA, Sistema de Normas para la protección del Medio Ambiente, ATMÓSFERA. Requisitos higiénicos sanitarios: Concentraciones Máximas Admisibles, alturas mínimas de expulsión y zonas de protección sanitaria.

Tabla 1. Análisis de la Potencia Disponible vs Índice de consumo mensuales.

Mes	Año 2012		Año 2013		Año 2014	
	Disp. Pot	Índices kg/kWh	Disp. Pot	Índices kg/kWh	Disp. Pot	Índices kg/kWh
Enero	18.10	211.5	17.10	211.5	17.80	210.1
Febrero	18.40	211.3	14.20	211.5	17.40	209.8
Marzo	18.50	211.3	14.20	211.3	18.50	209.8
Abril	18.30	211.4	11.20	211.3	17.90	208.6
Mayo	8.60	211.3	13.90	211.5	17.30	208.8
Junio	14.20	211.9	15.30	211.5	17.20	208.8
Julio	15.40	211.4	17.20	211.6	16.80	209.9
Agosto	14.60	211.6	17.40	212.1	16.30	210.3
Septiembre	16.40	213.3	16.70	212.1	15.20	212.8
Octubre	14.70	212.5	16.70	211.1	13.50	213.2
Noviembre	12.70	212.5	16.90	206.5	15.50	211
Diciembre	14.90	211.4	17.00	210.6	18.00	211.1
Promedio	15.40	211.8	15.65	211.1	16.78	210.4

% de Carga de los motores vs índices de consumo						
Mes	Año 2012		Año 2013		Año 2014	
	Carga%	Índices kg/kWh	Carga%	Índices kg/kWh	Carga%	Índices kg/kWh
Enero	85.60	211.50	83.60	211.40	79.60	210.14
Febrero	86.20	211.82	84.80	211.43	78.60	209.18
Marzo	77.60	212.18	67.60	211.26	79.40	207.32
Abril	76.00	211.31	69.00	211.29	79.20	207.89
Mayo	75.20	211.42	80.80	211.55	81.00	209.47
Junio	67.00	212.07	78.20	211.49	78.80	211.49
Julio	82.00	211.95	73.40	211.68	77.20	212.75
Agosto	81.60	211.60	73.40	212.08	79.80	213.15
Septiembre	85.80	213.21	75.80	212.78	80.60	213.91
Octubre	87.60	212.58	79.80	211.54	64.80	213.19

<b>Noviembre</b>	67.00	212.45	84.40	206.71	77.60	212.40
<b>Diciembre</b>	84.80	211.38	81.80	210.56	77.60	212.23
<b>Promedio</b>	<b>79.70</b>	<b>211.96</b>	<b>77.72</b>	<b>211.15</b>	<b>77.85</b>	<b>211.09</b>

Año 2012	Promedio mensual	Motor #1	Motor #2	Motor #3	Motor #4	Motor #5	Índices de consumo
		Carga%	Carga%	Carga%	Carga%	Carga%	
Enero	85.60	82.00	87.00	85.00	86.00	88.00	211.50
Febrero	86.20	90.00	86.00	84.00	83.00	88.00	211.30
Marzo	77.60	73.00	83.00	76.00	76.00	80.00	211.30
Abri	76.00	69.00	84.00	73.00	74.00	80.00	211.40
Mayo	75.20	56.00	85.00	75.00	73.00	87.00	211.30
Junio	83.75	0.00	86.00	82.00	77.00	90.00	211.90
Julio	82.00	82.00	83.00	80.00	77.00	88.00	211.40
Agosto	81.60	80.00	82.00	80.00	79.00	87.00	211.60
Septiembre	85.80	83.00	89.00	87.00	82.00	88.00	213.30
Octubre	87.60	87.00	90.00	87.00	84.00	90.00	212.50
Noviembre	67.00	83.00	85.00	82.00	0.00	85.00	212.50
Diciembre	84.80	83.00	87.00	83.00	82.00	89.00	211.40
Promedio anual/motor	78.91	85.58	81.17	72.75	86.67	211.78	

Año 2013	Promedio mensual	Motor #1	Motor #2	Motor #3	Motor #4	Motor #5	Índices de consumo
		Carga%	Carga%	Carga%	Carga%	Carga%	
Enero	83.60	85.00	84.00	84.00	80.00	85.00	211.50
Febrero	84.80	88.00	85.00	88.00	78.00	85.00	211.50
Marzo	84.50	0.00	83.00	88.00	84.00	83.00	211.30
Abri	86.25	0.00	86.00	89.00	88.00	82.00	211.30
Mayo	80.80	82.00	78.00	80.00	83.00	81.00	211.50
Junio	78.20	78.00	81.00	78.00	83.00	71.00	211.50
Julio	73.40	79.00	71.00	78.00	75.00	64.00	211.60
Agosto	73.40	70.00	71.00	78.00	75.00	73.00	212.10
Septiembre	75.80	75.00	77.00	73.00	77.00	77.00	212.10
Octubre	79.80	79.00	81.00	82.00	75.00	82.00	211.10
Noviembre	84.40	85.00	86.00	86.00	79.00	86.00	206.50
Diciembre	81.80	83.00	79.00	84.00	78.00	85.00	210.60
Promedio anual/motor	80.40	80.17	82.33	79.58	79.50	211.05	

---

Año 2014	Promedio mensual	Motor #1	Motor #2	Motor #3	Motor #4	Motor #5	Índices de consumo
		Carga%	Carga%	Carga%	Carga%	Carga%	
Enero	79.60	81.00	76.00	81.00	77.00	83.00	210.10
Febrero	78.60	80.00	76.00	81.00	76.00	80.00	209.80
Marzo	79.40	81.00	76.00	82.00	78.00	80.00	209.80
Abril	79.20	80.00	75.00	81.00	79.00	81.00	208.60
Mayo	81.00	81.00	78.00	82.00	81.00	83.00	208.80
Junio	78.80	84.00	79.00	80.00	84.00	67.00	208.80
Julio	77.20	85.00	79.00	68.00	84.00	70.00	209.90
Agosto	79.80	88.00	85.00	70.00	86.00	70.00	210.30
Septiembre	80.60	88.00	85.00	72.00	87.00	71.00	212.80
Octubre	81.00	83.00	83.00	74.00	84.00	0.00	213.20
Noviembre	77.60	82.00	82.00	71.00	84.00	69.00	211.00
Diciembre	77.60	83.00	80.00	72.00	81.00	72.00	211.10
Promedio anual/motor	83.00	79.50	76.17	81.75	75.09	210.35	