



Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas

Facultad de Ingeniería Mecánica

TRABAJO DE DIPLOMA

**Impacto sobre la contaminación atmosférica de la generación de
electricidad con unidades diésel en el polo turístico Cayo Santa María**

Autor: Jorge Antonio Felipe García

Tutor: Dr. C. Idalberto Herrera Moya

**Santa Clara 2014
"Año 56 de la Revolución"**

Pensamiento

"No necesito saberlo todo tan sólo necesito saber dónde encontrar aquello que me hace falta cuando lo necesite"

Albert Einstein

Resumen.

El trabajo que se presenta consta de tres capítulos. El primero es una revisión bibliográfica sobre temas relacionados con la contaminación atmosférica y sus principales consecuencias para el medio ambiente, donde se consultan algunas de las principales normas relacionadas con el tema. En el capítulo 2 se realizó una caracterización de la planta, se analizaron los principales consumos de combustible y las emisiones correspondientes. Se determinó que el por ciento de carga más significativo para estos motores es el 75% al cual operan con mayor frecuencia, así como el consumo específico de combustible promedio correspondiente para el año 2013. En el capítulo 3 se analizan los principales resultados obtenidos durante la investigación. Se determinó que el contaminante emitido en mayor cuantía es el NO₂. A partir de la modelación se determinó que las concentraciones de NO₂ en varios días del año superan el límite permisible establecido por la norma cubana para este contaminante en 24 horas. Se verificó una alta relación entre la concentración de contaminantes en la atmosfera y el consumo de combustible.

Abstract.

The work presented consists of three chapters. The first is a literature review on issues related to air pollution and its consequences for the environment, some of the major standards related which the topic where studied. In Chapter 2, a characterization of the plant was performed; fuel consumption and corresponding emissions were analyzed. It was determined that much frequent load rate of these engines is 75% also the average specific fuel consumption for 2013 was determined. In Chapter 3 are discusses the main results obtained during the research. It was determined that the pollutant NO₂ is the largest emitted. From the modeling was determined that concentrations of NO₂ in various days of the year exceed the allowable limit set by the International Standard for this pollutant in 24 hours. A high ratio between the concentration of pollutants in the atmosphere and fuel consumption was verified.

Agradecimientos.

Agradecer a mi familia por su apoyo incondicional, especialmente a mis padres y mis suegros.

Agradezco a mi tutor Idalberto Herrera Moya por la ayuda que me brindó.

Agradezco al personal técnico y directivo de la Central Eléctrica ``Cayo Santa María``, especialmente a los compañeros: Ana Iris, Begsi, Juan Carlos, Jesús Cabarroca y Adrián.

Agradezco a todos los profesores por su dedicación y entrega en el transcurso de estos cinco años de carrera.

Agradezco a mi novia por alentarme y brindarme su apoyo en todo este tiempo.

Agradecer a Daniel, mi segundo papá, gracias por los consejos.

A mis compañeros: Eliecer, Daril Rodríguez, Ibrahim, Edney, Lisan, John Raymond y Liber, por toda su ayuda.

Agradezco a todos aquellos que de una forma u otra han contribuido a la realización de este trabajo y a mi formación como ingeniero.

``Muchas Gracias``

Índice.

1. Introducción.....	1
Capítulo 1. Marco teórico de la investigación.....	3
1.1. Escala geográfica de los impactos relacionados con la contaminación del aire. ..	3
1.2. Fuentes de contaminación del aire.....	4
1.2.1. Contaminantes primarios.....	4
1.2.2. Contaminantes secundarios.....	4
1.2.3. Clasificación de las fuentes emisoras.	4
1.3. Contaminantes criterio para definir estándares de calidad del aire.....	4
1.4. Gases de efecto invernadero y el cambio climático.	5
1.5. Efectos adversos de la contaminación del aire.	6
1.5.1. Efectos de los contaminantes del aire.....	6
1.5.3. Otros impactos de la contaminación del aire.....	7
1.5.4 Impactos de los motores de combustión interna sobre el medio ambiente.	8
1.6. La contaminación del aire en Cuba.....	8
1.7. Normas cubanas relacionadas con la calidad del aire.	9
1.7.1. NC 39: 1999 Normas de Calidad del Aire "Salud y Requisitos Sanitarios".....	10
1.7.2. Norma Cubana NC 111: 2004, Normas para la Observación de la Calidad del Aire en los Establecimientos Humanos.....	13
1.7.3. NC 242: 2005, Guía de datos tecnológicos para el inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos procedentes de fuentes puntuales industriales.....	15
1.7.4. NC-TS 803: 2010 Normas de calidad del aire para las emisiones permisibles de contaminantes atmosféricos en fuentes fijas puntuales de las instalaciones de generación de electricidad y vapor.....	16
1.7.4.1 Consideraciones para la selección de los puntos de muestreo para emisiones gaseosas de los grupos electrógenos.....	17
1.7.4.2. Metodología para la selección del punto de muestreo.	18
1.7.4.3. Frecuencia para realizar la medición de las emisiones.	18
1.8. Metodología.....	18
1.8.1. Caracterización del área de estudio y los límites.	20
1.8.2. Definición de las instalaciones energéticas que se incluirán en el análisis de escenarios.....	21
1.8.3. Auditoría energética.	21
1.8.4. Inventario de emisiones.	21
1.8.5. Cálculo de las tasas de emisión usando factores de emisión.	22
1.8.6. Cálculo de las tasas de emisión mediante mediciones	22
1.8.8. Dispersión de contaminantes, determinación de la concentración de contaminantes.....	23
1.9. Software para la modelación de los contaminantes.	23

1.9.1. Descripción del modelo ISC3	23
1.9.2. Breve descripción del modelo ISCST3.....	24
Capítulo 2. Impacto sobre la contaminación atmosférica de la generación diésel en Cayo Santa María.	25
2.1. Características generales de la instalación.	25
2.1.1. Breve reseña histórica de la entidad.	26
2.1.2. Objeto Social de la Unión Eléctrica.	26
2.2. Característica técnica de los grupos electrógenos.	28
2.2.1. Breve descripción de un grupo electrógeno.	28
2.3. Principales parámetros de los grupos electrógenos (16v-4000).....	29
2.4 Esquema de distribución del combustible diésel.	29
2.5. Consumo de combustible.	30
2.6. Resumen del régimen de carga del 2013. (MTU).....	32
2.7. Valoración de la eficiencia y el consumo de combustibles en las unidades generadoras diésel.....	33
2.8. Emisiones y modelación de la dispersión de contaminantes.	34
2.8.1. Determinación de las emisiones de gases contaminantes.....	34
2.8.2. Cálculo de las tasas de emisión usando factores de emisión.	34
2.8.3. Cálculo de las tasas de emisión mediante mediciones.	35
2.8.3.1. Equipamiento, mediciones y nivel de emisiones, cumplimiento de la NC TS 803: 2010.	35
2.8.4. Tasas de emisión e inventario de emisiones.....	37
2.8.5. Inventario de emisiones.	37
2.10. Modelación de la dispersión de contaminantes.....	40
2.10.1. Descripción del modelo utilizado.	40
2.10.2. Parámetros de emisión de las fuentes.	42
2.10.3. Impacto asociado al dióxido de azufre.	42
2.10.4. Impacto asociado al dióxido de nitrógeno.	44
2.10.4. Impacto asociado al PM10.	47
Capítulo 3: Análisis de los resultados.....	50
3.1. Introducción.....	50
3.2. Variabilidad de la demanda.....	50
3.3. Análisis del régimen de carga.	51
3.4.1. Análisis del día de mayor emisión.	57
Conclusiones.....	59
Recomendaciones.....	60
Bibliografía	61
Anexo 1- Emisión variable, ejemplo de parte del fichero de emisión de NOx.	63
Anexo 2- Concentración de SO2 para 24h.....	64

Anexo 3- Concentraciones de NOX para 24 h.	65
Anexo 4- Concentraciones de NO _x para un año.	66
Anexo 5- Concentraciones de PM ₁₀ para 24h.	67
Anexo 6- Concentraciones de PM ₁₀ para un año.	68

1. Introducción.

La degradación del medio ambiente debido a la actitud adoptada por el hombre hacia la naturaleza ha dado lugar a uno de los problemas capitales de la actualidad, la contaminación del medio ambiente.

La visión del hombre sometiendo a la naturaleza de manera desmedida llevó a la explotación los recursos naturales con una total indiferencia ante todo lo que no repercutiera en beneficio directo del hombre. El uso intensivo de los recursos naturales, incluyendo los energéticos, y el desarrollo de grandes concentraciones industriales y urbanas de forma descontrolada, son fenómenos que han dado lugar a la saturación de la capacidad asimiladora y regeneradora de la naturaleza. Estos fenómenos complejos pueden llevar a la pérdida irreversible del equilibrio ecológico general, con consecuencias difíciles de predecir a largo plazo [1].

Uno de los principales problemas que enfrentan hoy tanto los países desarrollados como los subdesarrollados, es lograr un equilibrio que permita obtener la energía que necesitan para su desarrollo de forma económica y sin dañar el entorno.

En la actualidad la energía eléctrica se genera mayoritariamente a partir de combustibles fósiles. La instalación de los grupos electrógenos (GE) en Cuba fue una de las medidas tomadas en la batalla por el ahorro energético. Un grupo electrógeno está formado básicamente por un conjunto integrado que contiene un motor de combustión interna, un generador eléctrico acoplado en el mismo eje y los correspondientes elementos auxiliares y sistemas complementarios. La reacción de combustión es la fuente de energía primaria de esta tecnología que a la vez que transforma la energía química del combustible en energía eléctrica emite sustancias tóxicas tales como: óxidos de nitrógeno, partículas, monóxido y dióxido de carbono, hidrocarburos y compuestos de azufre entre otros. Debido a ello la generación de electricidad produce impactos locales como la contaminación atmosférica de áreas urbanas industriales; regionales como la lluvia o deposición ácida; y globales como el cambio climático.

En este sentido la evaluación de la calidad de aire mediante el monitoreo de las emisiones y su dispersión en la atmósfera permite verificar el cumplimiento de las normas higiénico sanitarias de calidad de aire y el cumplimiento de la norma técnica que regula las emisiones de contaminantes, así como tomar medidas para mitigar en la medida de lo posible la contaminación atmosférica [1].

El aire se considera como un bien común limitado, indispensable para la vida; por lo tanto este debe estar sujeto a normas que eviten el deterioro de su calidad de tal modo que se preserve su pureza como garantía del normal desarrollo de los seres vivos en la Tierra y de la conservación del patrimonio natural de la humanidad. Es por ello que se hace necesario realizar monitoreos de la calidad del aire para conocer los niveles de contaminación en todas las zonas donde existen y o se prevé la instalación de industrias o plantas de generación de energía eléctrica a base de combustibles fósiles, por constituir estas, generalmente importantes fuentes

emisoras de gases contaminantes y partículas. Resulta esencial para la sociedad en pos de un desarrollo sostenible minimizar los impactos del hombre sobre el medio ambiente y al mismo tiempo satisfacer las necesidades de energía sin afectar la calidad de vida de las generaciones presentes y futuras.

Problema científico

No se ha valorado adecuadamente el impacto sobre la calidad del aire en el polo turístico Cayo Santa María de la generación de electricidad con unidades diésel, fuente que representa el 51% de la capacidad instalada para cubrir la demanda del polo.

Hipótesis

El crecimiento de la demanda de energía eléctrica en el polo turístico de la Cayería Norte de Villa Clara y su generación mediante grupos electrógenos pudiera causar impactos ambientales considerables en términos de deterioro de la calidad del aire a escala local, debido a las emisiones de gases contaminantes.

Objetivo General

Diagnosticar el impacto sobre la contaminación atmosférica de la Planta Eléctrica Cayo Santa María, con especial atención a la generación de energía eléctrica con combustible diésel con vista a su cuantificación y el establecimiento de acciones de mitigación.

Objetivos específicos

- Caracterizar la planta de generación de energía eléctrica Cayo Santa María, incluyendo, localización, capacidad instalada, consumo de combustible y generación de energía.
- Determinar las emisiones de los principales contaminantes gaseosos producto de la combustión y los parámetros de las emisiones para las unidades de generación diésel.
- Cuantificar mediante la modelación de la dispersión de contaminantes en el área de estudio el impacto sobre la calidad del aire.

Capítulo 1. Marco teórico de la investigación.

1.1. Escala geográfica de los impactos relacionados con la contaminación del aire.

En los últimos sesenta años, el uso cada vez mayor de la energía fósil, ha sido la principal causa de las emisiones de contaminantes atmosféricos y diversos problemas ambientales. Los combustibles fósiles son la principal fuente de dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, dióxido de carbono y hollín. También constituyen una gran fuente de metano, y compuestos orgánicos volátiles. Estas sustancias contribuyen al deterioro de la salud humana, los ecosistemas y los materiales.

Dependiendo de la especie contaminante y las condiciones atmosféricas, la magnitud de los impactos ambientales puede variar en un rango de muy local a regional y mundial. En general, los efectos de la contaminación del aire son una función que depende fundamentalmente, entre otros factores, del grado de superación del umbral sobre el cual se generan efectos. El uso de energía actualmente se identifica como un contribuyente a la mayoría de ellos.

Las diferentes escalas geográficas de los impactos de los contaminantes derivados del uso de la energía se definen a continuación [2].

Escala local: Algunos contaminantes, dependiendo de su origen y tiempo de vida atmosférica, sólo se encuentran en concentraciones apreciables cerca de donde se emiten, por lo general a una distancia de menos de un centenar de kilómetros. Este es el caso de algunos contaminantes procedentes de procesos de combustión, tales como óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono u óxidos de azufre. Por ejemplo en las zonas urbanas una vez emitidos estos contaminantes tienden a estar presentes en concentraciones altas en toda la ciudad y en concentraciones reducidas en las zonas adyacentes. La vida de estos contaminantes en la atmósfera no es larga (normalmente horas) y, por tanto, las concentraciones en la atmósfera a distancia tienden a ser muy bajas. Cerca de las fuentes de emisiones, estos contaminantes pueden causar impactos, por ejemplo, en los materiales y en la salud de las personas [2].

Escala regional: Los contaminantes en forma de partículas finas y algunos contaminantes en fase gaseosa como el ozono tienen una vida atmosférica de días o incluso semanas, lo que les permite ser transportados en una escala regional. Los contaminantes tales como partículas de sulfato y de ozono fácilmente viajan miles de kilómetros en un proceso conocido como transporte a larga distancia, los aerosoles de carbono negro derivado de la quema de combustibles fósiles pueden ser transportados larga distancia [2].

Escalas hemisféricas y globales: Algunos contaminantes, y en especial los relacionados con el efecto invernadero tienen una vida atmosférica de años y por lo tanto pueden dispersarse por todo un hemisferio y en última instancia a nivel mundial. En estos casos, las concentraciones son a menudo ligeramente mayores

cerca de las fuentes en comparación con las concentraciones de fondo regional, a menos que las fuentes emitan cantidades muy grandes [2].

1.2. Fuentes de contaminación del aire.

Los contaminantes del aire pueden resultar, de emisiones directas a la atmósfera (contaminantes primarios) o de transformaciones de las emisiones directas el propio ambiente (contaminantes del aire secundarios) [2].

1.2.1. Contaminantes primarios.

Son aquellos emitidos directamente a la atmósfera y entre los más importantes se encuentran partículas y algunos gases como óxidos de azufre, monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno que provienen de fuentes fijas y móviles, como plantas generadoras de energía eléctrica que utilizan carbón o petróleo, de industrias o incineradores y de los motores de los vehículos [2].

1.2.2. Contaminantes secundarios.

Bajo condiciones apropiadas, los contaminantes primarios sufren reacciones químicas en la atmósfera y generan los llamados contaminantes secundarios. Algunas de estas reacciones requieren de la luz solar para que ocurran a velocidades apreciables, de ahí que se les denomine reacciones fotoquímicas. El contaminante secundario más conocido a nivel de los centros urbanos es el ozono. Otro es el ácido sulfúrico y sus derivados (que aparecen como aerosoles secundarios) provenientes de la transformación de dióxido de azufre en la atmósfera [2].

1.2.3. Clasificación de las fuentes emisoras.

- ✓ **Fuente fija o estacionaria:** toda fuente que opera en lugar fijo, cuyas emisiones se descargan a través de un ducto o chimenea. Como ejemplo la industria en general. [3]
- ✓ **Fuente móvil:** son las correspondientes al transporte automotor.

1.3. Contaminantes criterio para definir estándares de calidad del aire.

Varios cientos de diferentes componentes se han encontrado en la troposfera, muchos de ellos potencialmente perjudiciales para la salud humana y el medio ambiente. A nivel mundial, las agencias ambientales han desarrollado un conjunto básico de indicadores de contaminación del aire y los contaminantes criterio, que han sido ampliamente utilizados para caracterizar la calidad del aire.

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), por sus siglas en inglés, bajo la Ley de Aire Limpio, ha establecido normas nacionales de calidad del aire para seis contaminantes atmosféricos comunes, los llamados contaminantes criterio para indicar la calidad del aire, con el objetivo de proteger la salud pública y el medio ambiente. Estos incluyen: 1 - monóxido de carbono, 2 - ozono, 3 - plomo, 4 - dióxido de nitrógeno, 5 - partículas, y dióxido de azufre-6 [4].

En Cuba, según la norma NC 111: 2004 [5], las principales especies contaminantes para supervisar en los programas de vigilancia de la calidad del aire incluyen 1 - dióxido de azufre, 2 - dióxido de nitrógeno, 3 - 4 Total de partículas suspendidas - Partículas de ≤ 10 micras de diámetro aerodinámico, 5 - monóxido de carbono, y 6 - de ozono.

1.4. Gases de efecto invernadero y el cambio climático.

El cambio climático es un problema ambiental importante en la actualidad. Sus impactos son de largo alcance en el espacio y en el tiempo, mientras que la prosperidad y el uso de combustibles fósiles estén estrechamente entrelazados [2]. Las emisiones procedentes de la combustión de combustibles fósiles representan alrededor del 80% del aumento de dióxido de carbono (responsable del 50% del efecto invernadero).

El crecimiento de las emisiones globales de CO₂ de los promedios de energía 1,2% anual en los próximos veinte años, debido al crecimiento en el consumo de energía fuera de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), dejando a las emisiones en el año 2030 el 27% más alto que el actual. La implementación de las políticas de reducción de carbono en la OCDE reduce las emisiones en 2030 sólo un 10% con respecto a los niveles actuales [6].

El sector de generación de energía es el mayor contribuyente mundial a las emisiones de CO₂. Muchos gobiernos están tratando de limitar las emisiones de gases de efecto invernadero mediante la promulgación de políticas que pongan un costo a las emisiones de CO₂. Entonces el carbón, que emite mucho más CO₂ que otros combustibles, se vuelve menos atractivo. En 2020, la adopción de estas políticas será equivalente a la adición de costos por emisión de CO₂ de alrededor de \$30 por tonelada en la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE). En este nivel, el gas natural se convierte en una fuente de menor costo que el carbón. Esto es aún más eficaz si los costes de CO₂ aumentan a \$60 por tonelada, lo que se espera en las políticas de la OCDE para reducir los costes en 2030. A partir de \$60 por tonelada, todavía algunas opciones pueden no ser competitivas, como, la solar, y las plantas que usan carbón y gas empleando tecnología de Captura y Almacenamiento de Carbono (CAC). La tecnología de CAC parece tener el potencial de ser una tecnología eficaz para reducir las emisiones, pero la mayoría de los proyectos de Captura y Almacenamiento de Carbono aún requieren el apoyo económico de los gobiernos.

En Cuba los niveles de emisión del Gas de Efecto Invernadero (GEI) son bajos en comparación con los países industrializados. Éstas emisiones evolucionaron en paralelo con el consumo de energía fósil, pero el aumento en la eficiencia en la conversión de energía y empleo de gas en la matriz de energía para la generación de electricidad ha tendido a reducir las emisiones de CO₂ en los últimos años [5].

1.5. Efectos adversos de la contaminación del aire.

La contaminación del aire causa daño a una amplia gama de receptores, incluyendo la población, los cultivos, bosques, edificios, y otros. Los efectos de la contaminación del aire son influenciados por el tipo y cantidad de contaminantes y sus posibles interacciones con el medio ambiente [7].

1.5.1. Efectos de los contaminantes del aire.

La contaminación en el aire puede suponer una carga excesiva para el sistema respiratorio y contribuir a una mayor morbilidad y mortalidad, especialmente entre las personas susceptibles en la población general. El impacto en la salud humana es causado por una amplia gama de gases, las partículas y el dióxido de azufre, se han correlacionado con daños graves para la salud en Europa y América del Norte durante los últimos 150 años. Entre los episodios más estudiados se encuentra el smog experimentado durante el año 1950 en Londres, lo que llevó al desarrollo de la Ley de Aire Limpio en el Reino Unido. A continuación se muestran algunos de los contaminantes emitidos por los motores de combustión interna y su afectación a la salud [7].

Partículas: El tamaño de las partículas está directamente relacionado con su potencial para causar problemas de salud. Las partículas pequeñas ($\leq 10 \mu m$) y finas ($\leq 2,5 \mu m$) pueden causar los mayores problemas, estas pueden penetrar profundamente en los pulmones, y algunas incluso pueden pasar al torrente sanguíneo. La exposición a estas partículas puede afectar tanto, los pulmones como el corazón. Las evidencias científicas han relacionado la exposición a partículas en suspensión a una variedad de problemas, incluyendo: - la muerte prematura en personas con enfermedad cardíaca o pulmonar, - ataques fatales al corazón, - ritmo cardíaco irregular, - asma agravado, - la disminución de la función pulmonar, y - aumento de los síntomas respiratorios, tales como irritación de las vías respiratorias, tos o dificultad para respirar. Las personas con enfermedades cardíacas o pulmonares, los niños y los adultos mayores son los más propensos a ser afectados por exposición a la contaminación de partículas. Sin embargo, incluso una persona sana puede experimentar síntomas por exposición temporal a niveles elevados de partículas [8].

Dióxido de azufre: Evidencia científica actual vincula la exposición por períodos cortos a SO_2 , que van desde 5 minutos hasta 24 horas, con diversos efectos respiratorios adversos incluyendo aumento de los síntomas de asma. Estos efectos son particularmente importantes para los asmáticos cuando experimentan ritmos de respiración elevados (por ejemplo, practicando ejercicios físicos). Los estudios también muestran una relación entre la exposición a corto plazo y el aumento de las visitas a urgencias y los ingresos hospitalarios por enfermedades respiratorias, especialmente en las poblaciones en situación de riesgo, incluyendo niños, ancianos y asmáticos. El SO_2 es el componente de mayor preocupación y se utiliza como el indicador para el grupo más grande de los óxidos de azufre gaseosos (SO_x) [8].

Dióxido de nitrógeno: Evidencia científica actual vincula la exposición a NO₂ a corto plazo, que va desde 30 minutos hasta 24 horas, con efectos respiratorios adversos, incluyendo la inflamación de las vías respiratorias en las personas sanas y el aumento de los síntomas respiratorios en las personas con asma. Además, los estudios muestran una conexión entre la existencia de elevada de concentración de NO₂ a corto plazo, y el aumento de las visitas a los servicios de urgencias y los ingresos hospitalarios por problemas respiratorios, especialmente el asma. La suma de óxido nítrico (NO) y NO₂ comúnmente se llama óxidos de nitrógeno o NO_x. NO₂ es el componente de mayor interés y el indicador fundamental para evaluar el impacto de los óxidos de nitrógeno [8].

Monóxido de Carbono: En los niveles extremadamente altos, el CO puede causar la muerte. La exposición al monóxido de carbono puede reducir la capacidad de transporte de oxígeno de la sangre. Para las personas con varios tipos de enfermedades del corazón la exposición a corto plazo al CO afecta la capacidad de su cuerpo para responder a la demanda de oxígeno [8].

Ozono: O₃ puede dañar la salud humana, por lo general en los días calurosos y soleados, cuando el ozono puede llegar a niveles insalubres. Incluso niveles relativamente bajos de ozono puede causar efectos en la salud. Las personas con enfermedades pulmonares, niños, adultos mayores y las personas que están activos al aire libre pueden ser particularmente sensibles al ozono. Respirar ozono puede accionar una variedad de problemas de salud como dolor de pecho, tos, irritación de garganta y congestión. Se puede empeorar la bronquitis, el enfisema y el asma. El ozono a nivel del suelo también puede reducir la función pulmonar e inflamar el revestimiento de los pulmones [9].

1.5.3. Otros impactos de la contaminación del aire.

Los impactos sobre la vegetación: El ozono y el dióxido de azufre tienen un impacto sobre los cultivos, los bosques y la vegetación natural. Las consecuencias directas de elevadas concentraciones de SO₂ se limitan esencialmente a las zonas urbanas, las zonas peri-urbanas y cerca de las fuentes industriales de contaminación, aunque la deposición seca y húmeda de sustancias acidificantes como resultado se produce a escala continental. El ozono, una vez formado puede ser transportado en la atmósfera y afectar áreas mucho más grandes. Los contaminantes gaseosos pueden afectar a la vegetación a través de lesiones y/o los efectos sobre el crecimiento y rendimiento de las plantas en general causándole algunos cambios [10].

Impactos de corrosión en materiales: SO₂ es uno de los principales contribuyentes a la degradación de los materiales. Este proceso resulta en una acidificación de la capa de humedad, lo que mejora el proceso de corrosión. SO₂ se oxida parcialmente en la atmósfera y por tanto contribuye a la oxidación de los metales [10].

Acidificación: Emisiones gaseosas tales como dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno se oxidan rápidamente a sulfato y nitrato y el amoníaco se transforma en amonio en la atmósfera. Estos contaminantes pueden viajar grandes distancias, transportados por el viento a través de cientos de kilómetros para luego precipitarse como deposición húmeda mediante la lluvia o como deposición seca en las superficies. La deposición del azufre y del nitrógeno pueden acidificar los ecosistemas de lagos y agua corriente. La acidificación del suelo puede tener impactos en la vegetación, lo que conduce a pérdidas en la biodiversidad y vigor de las plantas [10].

La eutrofización: La deposición de nitrógeno ya sea como amonio o nitrato puede eutrofizarse (nitrificar en exceso) en los ecosistemas terrestres causando cambios en la estructura y función. El nitrógeno es un importante nutriente para las plantas que a menudo limita el crecimiento en los ecosistemas terrestres. Por lo tanto las adiciones de nitrógeno pueden causar un aumento del crecimiento que promueve la proliferación de especies con una alta demanda de nitrógeno a expensas de aquellas especies que requieren menos nitrógeno. Los ecosistemas marinos costeros pueden ser muy sensibles a concentraciones crecientes de nitratos. Esto se aplica también en las regiones tropicales, donde los arrecifes de coral pueden verse afectados de forma significativa [10].

1.5.4 Impactos de los motores de combustión interna sobre el medio ambiente.

A continuación se exponen algunos de los principales efectos productos de la combustión de hidrocarburos, que además de causar perjuicios en la salud de los seres vivos, contamina la atmósfera y los centros urbanos con la deposición de partículas, el mismo que se impregna en las edificaciones, monumentos y plantas cubriéndolos con un manto gris. También son los responsables del calentamiento global, los cambios climáticos y las lluvias ácidas [5].

Las formas más importantes de acción del Motor de Combustión Interna (MCI) sobre el medio ambiente se muestran a continuación.

- ✓ Agotamiento de materias primas no renovables consumidas para el funcionamiento de los MCI.
- ✓ Consumo de oxígeno que contiene el aire atmosférico.
- ✓ Emisión y contaminación de la atmósfera con gases tóxicos que perjudican al hombre, la flora y la fauna.
- ✓ Emisión de sustancias que provocan el llamado efecto invernadero contribuyendo a la elevación de la temperatura de nuestro planeta.
- ✓ Consumo de agua potable.
- ✓ Emisión de altos niveles de ruido a la atmósfera que disminuye el rendimiento de los trabajadores y ocasiona molestias en sentido general.

1.6. La contaminación del aire en Cuba.

La calidad del aire en varias ciudades se ha convertido en un problema visible debido a las emisiones no controladas [8].

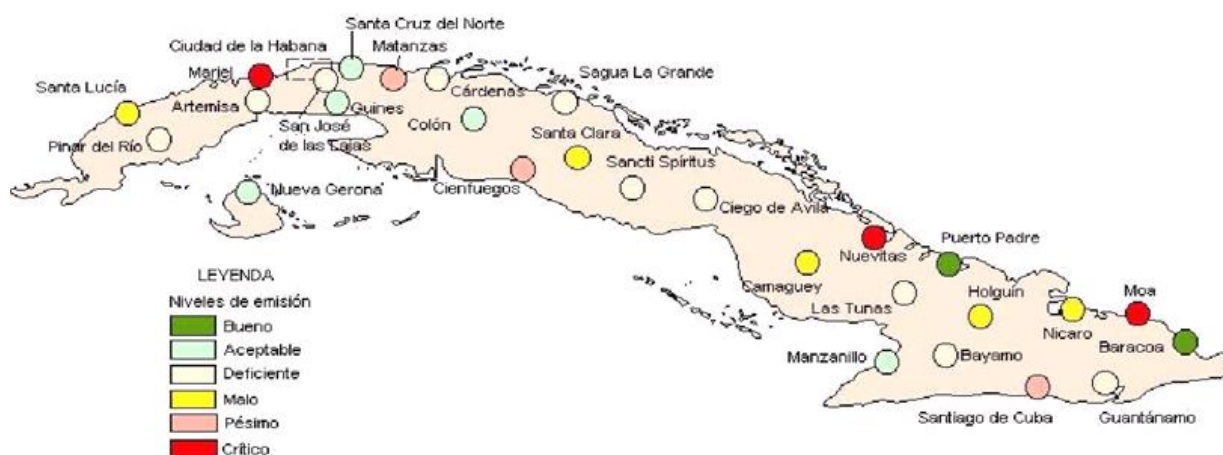


Figura 1. Estado de la calidad del aire en 28 ciudades cubanas.

Las principales causas de la contaminación del aire son: deficiencias en la planificación territorial de los asentamientos humanos y de la industria, el uso de viejas tecnologías con las rutinas de mantenimiento inadecuados, y un modelo de consumo energético basado alrededor del 90 % en los combustibles fósiles y los ciclos de combustión.

En Cuba, el balance de energía mantiene una estrecha relación con la calidad del aire, debido al tipo de combustible utilizado, ya que la instalación de dispositivos de limpieza de los gases está ausente. Los principales problemas se presentan en las zonas industriales, donde las viejas tecnologías siguen cubriendo las necesidades de energía.

Por otra parte, Cuba es uno de los países con limitada capacidad de monitoreo del aire, debido a la falta de tecnología. Aunque existen organizaciones a cargo del control de calidad del aire, y existe un marco regulatorio adecuado, con el apoyo de la legislación ambiental y las normas para el control de la calidad del aire y las emisiones.

1.7. Normas cubanas relacionadas con la calidad del aire.

Los estándares de calidad del aire basados en la salud son uno de los principales componentes de los procesos de gestión de la calidad del aire. Estos están diseñados para proteger la salud de la población general; sin embargo, algunos individuos altamente susceptibles pueden sufrir algunas consecuencias personales, incluso cuando las concentraciones de gases cumplan con lo planteado por las normas de calidad del aire.

Una referencia en todo el mundo para establecer el estándar de calidad del aire son las directrices de calidad del aire dadas por la Organización Mundial de Salud (OMS) [5]. Estas directrices están destinadas para su uso en todo el mundo, pero se han desarrollado para apoyar acciones para lograr una la calidad del aire que proteja la salud pública en diferentes contextos. Sin embargo las directrices nacionales de calidad del aire deben ser fijadas por cada país, y varían de acuerdo

con el enfoque adoptado para alcanzar el equilibrio entre: los riesgos para la salud, la viabilidad tecnológica, consideraciones económicas y otros factores políticos y sociales, que a su vez dependerá del nivel de desarrollo y la capacidad nacional en la gestión de la calidad del aire. Esto conduce a las disparidades actuales en las normas de los diferentes países. Los valores recomendados por la Organización Mundial de Salud (OMS) reconocen esta heterogeneidad y en particular, reconocen que en la formulación de objetivos de política, los gobiernos deberían considerar cuidadosamente sus propias circunstancias locales antes de la adopción de normas protegidas legalmente. Una vez decidido un nivel aceptable de efectos las normas se convierten en puntos de referencia de la aceptabilidad. Pueden servir como objetivos a largo plazo para diseñar estrategias de control. Todas las normas de calidad del aire deben combinar una concentración y un tiempo promedio. Ese tiempo promedio deberá tener en cuenta la duración de la exposición asociada a la activación de las respuestas a la exposición del contaminante. Por lo tanto, para los gases irritantes, los tiempos de exposición son relativamente cortos ya que los efectos son agudos, mientras que para los carcinógenos genotóxicos los efectos son crónicos y los tiempos promediados son largos [5].

A continuación se presentan las principales normas cubanas relacionadas con la contaminación del aire:

- NC 39: 1999, Calidad del Aire - Salud y Requisitos Sanitarios.
- NC 111: 2004, Calidad del Aire - Reglas para la observación de la calidad del aire en los establecimientos humanos.
- NC 242: 2005, Guía de los datos tecnológicos para el inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos procedentes de fuentes puntuales industriales.
- NC TS 803: 2010, Calidad del aire - emisiones máximas admisibles de contaminantes a la atmósfera en fuentes fijas puntuales de las instalaciones de generación de electricidad y vapor.

1.7.1. NC 39: 1999 Normas de Calidad del Aire "Salud y Requisitos Sanitarios"

Esta norma se desarrolló para la protección de la salud pública de la población general en el territorio cubano. Para ello se establecen las concentraciones máximas admisibles para asegurar buenas condiciones de calidad del aire en los asentamientos humanos. Además se regula el tamaño de las zonas de protección alrededor de las fuentes de emisión. La norma también establece una metodología para el cálculo de la dispersión de los contaminantes del aire a la atmósfera por las chimeneas. Sin embargo, se ha quedado obsoleta esta metodología en relación con el desarrollo actual en lo relacionado con la dispersión de contaminantes, y las herramientas de modelación y su para lograr resultados más precisos en períodos más cortos de tiempo. La norma regula 115 especies contaminantes del aire, incluidos los seis principales contaminantes establecidos por la norma NC 111: 2004. En la Tabla 1 se muestran los valores de referencia internacionales para los principales contaminantes atmosféricos urbanos como una concentración promedio

ponderada en el tiempo en el aire, incluidos los valores dados en el norma NC cubana 39:1999.

La norma cubana sólo regula las concentraciones de contaminantes para las 24h y 1h, a pesar del peso que pueden tener períodos más prolongados de exposición en términos de impacto en la salud. Esto se asocia a limitaciones tecnológicas para la vigilancia de la calidad del aire [11].

En la tabla 1 se muestra que la norma cubana tiende a ser más estricta que las internacionales, excepto en el límite establecido para la concentración de SO_2 por hora. En cuanto a esta especie la norma cubana es la más tolerante, superando en un factor de 1,4 el valor establecido por el segundo más tolerante, que es la norma para la Unión Europea (UE). En el sentido opuesto, por ejemplo, para el NO_2 , la concentración máxima permitida en la norma cubana es 1,4 veces más exigente que el valor dado en las directrices de la Organización Mundial de la Salud (OMS). La tolerancia en las concentraciones de SO_2 se asocia con la necesidad del país de utilizar combustibles domésticos con alto contenido de azufre, que es una consecuencia de la situación económica. Sin embargo, la concentración máxima permisible para el SO_2 en 24h es 2 veces menor que el valor establecido en la norma de Japón, que es la segunda más estricta. Esta tendencia de la norma cubana se asocia con el bajo nivel de industrialización del país, y en consecuencia a una baja carga de emisión de contaminantes, lo que a su vez impone el reto de lograr un crecimiento económico sobre una base respetuosa del medio ambiente. Esto sin duda requerirá un esfuerzo extraordinario, teniendo en cuenta que la economía cubana se soporta en gran medida en los combustibles fósiles, que la mayoría de la tecnología energética es vieja y que no está en un estado técnico óptimo [11].

Tabla 1. Valores de referencia internacionales para los principales contaminantes atmosféricos urbanos como una concentración promedio ponderada en el tiempo en el aire [11].

Contaminantes	Tiempo	Norma de calidad de aire Unión Europea	Norma de calidad de aire US	Norma de calidad de aire Japón	Norma de calidad de aire de Cuba	Directivas de calidad para Europa
		Conc. ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Conc. ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Conc. ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Conc. ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Conc. ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
SO₂	10 min					500
	1 horas	350	196	262	500	
	24 horas	125		105	50	20
	Anual	20	80			
NO₂	1 horas	200	188		85	200
	24 horas			113	40	
	Anual	40	120			40
O₃	1 horas	160		118	80	
	8 horas	120	147			100
TSP	24 horas				100	
PM₁₀	24 horas	50	150	100	50	50
	Anual	40				20
PM_{2.5}	24 horas		35	35		25
	Anual	25	12	15		10
CO	1 horas		40mg/m ³	23mg/m ³	5mg/m ³	
	8 horas		10mg/m ³			
	24 horas	10mg/m ³		11.5mg/m ³	3mg/m ³	

1.7.2. Norma Cubana NC 111: 2004, Normas para la Observación de la Calidad del Aire en los Establecimientos Humanos.

Esta norma establece las normas para la vigilancia de la calidad del aire en los asentamientos humanos. La norma establece los principios de organización para los estudios de la calidad del aire en tres escalas: regional, urbano y local. La escala urbana comprende la determinación de la contaminación del aire en las ciudades, y requiere atención especial teniendo en cuenta que los sistemas urbanos están expuestos a cargas contaminantes más elevadas. Esta escala es de especial interés para este trabajo. Otro tema abordado en esta norma es la selección de los sitios donde la calidad del aire debería ser supervisada. Por otra parte esta norma establece los contaminantes que deben ser incluidos en los programas de vigilancia de la calidad del aire, con base en sus posibles efectos sobre la salud humana. Los principales contaminantes en el contexto cubano reconocido por esta norma son: dióxido de azufre (SO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂), partículas suspendidas totales (PST), partículas de 10 μm de diámetro aerodinámico (PM₁₀), el monóxido de carbono (CO) y el ozono (O₃). Las Condiciones de Calidad del Aire (CCA) en función de las concentraciones de contaminantes en el aire también son definidos por esta norma. Estas condiciones de calidad del aire para los asentamientos humanos se caracterizan por el Índice de Calidad del Aire (ICA), y se determina por la siguiente ecuación.

$$IC_A = \frac{C_A}{MCA}$$

Dónde: ICA_A es el índice de calidad del aire para la zona A [%], C_A es la concentración determinada como característica en esta zona [μg/m³]; y MAC es la concentración máxima permisible del contaminante definida en la norma cubana NC 39: 1999 [μg/m³]. Seis categorías de calidad del aire de acuerdo al ICA se definen en dicha norma. En la tabla 2 se muestran los contaminantes seleccionados. Cuando se evalúan varios contaminantes, será el más alto calculado el ICA representante para el área de estudio.

Tabla 2. Índice de calidad del aire, correspondiente estado de calidad del aire y la concentración máxima permisible.

Contaminante	CMA24h ^[1] (µg/m ³)	Concentraciones equivalentes a índice de calidad del aire y las condiciones de calidad ^[2]							
		ICA→	0 - 80	>80 -100	>100 -200	>200 -300	>300 - 500	> 500	
		CCA→	Buena	Aceptable	Deficiente	Mala	Pésima	Crítica	
SO ₂	50		0-40	>40-50	>50-100	>100-150	>150-250	>250	
NO ₂	40		0-32	>32-40	>40-80	>80-120	>120-200	>200	
PM ₁₀	50		0-40	>40-50	>50-100	>100-150	>150-250	>250	
CO	3000		0-2400	>2400-3000	>3000-6000	>6000-9000	>9000-15000	ICA>15000	

Leyenda: ICA (Índice de Calidad del Aire), CCA (Condición de Calidad del Aire).

[1] la concentración máxima permitida por el tiempo 24h promediado según la Oficina Nacional de Cuba de Normas, Calidad del aire - Salud y Requisitos Sanitarios. 1999.

[2] Según la Oficina Nacional de Cuba de Normas, Calidad del Aire - Reglas para la observación de la calidad del aire en los establecimientos humanos. 2004.

Cada condición específica a la calidad del aire tiene implicaciones para la salud específicos como muestra la Tabla 3 a continuación. Esta norma también establece acciones generales en respuesta a cada situación específica a la calidad del aire.

Tabla 3. Relación entre el Índice de Calidad del Aire y posibles implicaciones sanitarias relacionadas con cada Categoría de Calidad [8].

Categoría	Comentarios
Buena	No sobrepasa el 79 % del valor de la Cma prescrito en la NC. 39. Óptima calidad sanitaria del aire. Supuesta protección de toda la población (aunque no puede asegurarse que no sobrepase el umbral de respuesta de efectos adversos en individuos aislados).
Aceptable	No supera el 99 % de la Cma. Comienza el deterioro de la calidad del aire. Posible aparición de efectos leves en individuos o grupos de alta susceptibilidad (variabilidad individual de umbral de respuesta a los efectos) de muy difícil detección aún por investigaciones.
Deficiente	Sobrepasa entre 100 - 199 % el valor de la Cma prescrito en la NC 39. Ligero incremento en la frecuencia y severidad de los efectos adversos agudos y crónicos en la población general y principalmente en personas con enfermedades cardiovasculares, respiratorias y alérgicas y en otras de elevada susceptibilidad, solo detectables mediante investigaciones muy específicas y sensibles.
Mala	Supera entre 2 y 3 veces (200 – 300 %) el valor de la Cma. Aumento de la frecuencia y gravedad de los efectos adversos en grupos de alta susceptibilidad y en la población general, ya medibles mediante investigaciones específicas a escala individual y ecológica, basadas en registros morbilidad. Da lugar a una SITUACIÓN DE ATENCIÓN.
Pésima	Supera entre 3 y 5 veces el valor de la Cma. En dependencia del incremento de la concentración del contaminante y el tiempo de exposición continua el aumento de la frecuencia y gravedad de efectos adversos en los grupos de alta susceptibilidad y en la población general. Da lugar a una SITUACIÓN DE ALERTA.
Crítica	Se supera el límite de 5 veces la Cma, dando lugar a un incremento aún mayor del riesgo o probabilidad de ocurrencia de los efectos adversos sobre la salud de la población general y en grupos de riesgo, que se traduce en un evidente incremento agudo de la morbilidad y mortalidad que sobrecarga los servicios asistenciales; da lugar a una SITUACIÓN DE EMERGENCIA AMBIENTAL.

1.7.3. NC 242: 2005, Guía de datos tecnológicos para el inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos procedentes de fuentes puntuales industriales.

Esta norma establece los datos tecnológicos que deben tenerse en cuenta en la realización de un inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos generados por fuentes fijas industriales [12].

Instalaciones industriales individuales se suelen considerar como fuentes puntuales de contaminación, también una estación de energía podría ser considerado como una fuente puntual a pesar de que tiene más de una chimenea [12]. Sin embargo, en este trabajo cada chimenea, incluso en la misma planta, se considera como un único punto de origen de emisiones, lo que exige una alta resolución espacial.

Se establecen tres formularios de datos. La primera información de los registros relacionados con el proceso de inventario, incluye como datos principales, nombre de la empresa, datos de ubicación, la cantidad de fuentes puntuales, y los principales contaminantes emitidos por el proceso. La segunda información en el registro de cada fuente puntual específica incluye: horas de funcionamiento al año, la tasa de producción, parámetros geométricos, la información sobre el control de emisiones, y la información sobre los gases con los parámetros tales como: temperatura, velocidad, el volumen de los gases por unidad de producción. La tercera información es sobre el combustible, y los principales datos necesarios son: el tipo de combustible, contenido de azufre, el consumo anual y uso final del combustible. Esta norma establece el flujo de datos necesario y la forma en que deben organizarse, sin embargo, deja abierta la forma de obtener estos datos. Para establecer los datos de emisiones la NC-803 TS establece qué métodos se debe usar para la realización de las emisiones. Los diferentes métodos de cálculo de las emisiones se pueden utilizar, dependiendo de la disponibilidad de información, el tiempo, el personal y el financiamiento.

Un factor de emisión puede utilizarse para estimar las emisiones cuando no se dispone de datos reales de emisiones. En la mayoría de los casos, estos factores son simplemente promedios de todos los datos disponibles, de calidad aceptable, y en general se supone que sea representativo de la media a largo plazo para todas las instalaciones en la categoría de la fuente. Una extensa base de datos de factores de emisión se brinda por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), en FIRE (Sistema de datos Factor de Recuperación de Información), véase <http://cfpub.epa.gov/webfire>. Sin embargo, las variaciones en las condiciones en una instalación dada, tales como las materias primas utilizadas, la temperatura de combustión, y los controles de emisiones, pueden afectar las emisiones. Siempre que sea posible, se prefiere el desarrollo de factores de emisión locales.

1.7.4. NC-TS 803: 2010 Normas de calidad del aire para las emisiones permisibles de contaminantes atmosféricos en fuentes fijas puntuales de las instalaciones de generación de electricidad y vapor.

En Cuba, las emisiones de gases a la atmósfera son reguladas por la norma TS 803:2010. Esta norma establece las Emisiones Máximas Admisibles (EMA) de las instalaciones de generación de electricidad y vapor a fin de proteger la salud humana y el medio ambiente [13] De acuerdo con la norma los límites de emisiones deben cumplirse tanto para instalaciones existentes como nuevas. Estos deben ser controladas regularmente durante la operación. Excepcionalmente los valores de las emisiones máximas permitidas pueden ser más bajos que los que se establecieron en la norma. Estos valores más estrictos pueden ser dictados por la autoridad reguladora sobre la base de la evaluación de los impactos ambientales.

Las emisiones máximas permitidas se expresan como concentraciones de contaminantes en los gases secos liberados a la atmósfera por fuentes fijas; estos

se expresan en mg/Nm³, que corresponde al contenido en peso de contaminante por unidad de volumen de gas seco liberado a la atmósfera en condiciones normales de temperatura y presión. La tabla 4 muestra las EMA para las fuentes de emisión seleccionadas.

Esta norma establece también el método de referencia para el control de emisiones. Estos métodos se adoptaron a partir de la EPA y se pueden consultar en el sitio web de la agencia de URL: <http://www.epa.gov/ttn/emc>. La EPA también da recomendaciones sobre el uso del método.

Tabla 4. Emisión máxima admisible según la norma NC-TS Cubana 803: 2010.

fuente	Tipo de Combustible	Contaminantes	Categoría de la fuente	
			Operacional	Nuevo
			(mg/Nm ³)	
Centrales eléctricas	Fuel Oil	SO ₂	2500	2000
		NO _x	2000	1850
		PM	200	100
		PM ₁₀	160	80
	Diésel	SO ₂	1000	700
		NO _x	2000	1500
		PM	100	50
		PM ₁₀	80	40

1.7.4.1 Consideraciones para la selección de los puntos de muestreo para emisiones gaseosas de los grupos electrógenos.

La localización del punto de muestreo debe obtenerse de forma tal que cumpla con los requisitos normados, tenerse en cuenta desde la etapa de diseño de una planta, ya que estas constituyen fuentes de emisiones contaminantes que deberán estar sujetas a muestreos periódicos. Cuando esto no se prevé requiere luego de identificar sitios de muestreo que pueden requerir construcciones adicionales, o un análisis detallado de las posibilidades de muestrear en algunos puntos del sistema ya construido, esto último con el riesgo de que tales puntos no cumplan con los requisitos necesario para que las variables muestreadas sean representativas, a partir de que la toma de muestras no cumpla con los requisitos normados para el monitoreo.

En Cuba el monitoreo de las emisiones gaseosas de fuentes fijas puntuales, como las plantas de generación de energía eléctrica con motores de combustión interna, es regulado por la norma cubana NC TS 803: 2010 CALIDAD DEL AIRE EMISIONES MÁXIMAS ADMISIBLES DE CONTAMINANTES A LA ATMÓSFERA EN FUENTES FIJAS PUNTUALES DE INSTALACIONES GENERADORAS DE ELECTRICIDAD Y VAPOR. Dicha norma refiere para la selección del sitio de muestreo lo estipulado por la Agencia de Protección ambiental de los Estado Unidos (EPA) en el método 1-Selección del sitio de muestreo, determinación del número de puntos y su localización-, el cual se tuvo en cuenta para seleccionar los puntos de muestreo de las emisiones de gases para el estudio del impacto sobre la calidad del

aire de la Plantas de Generación de Electricidad con motores de combustión interna. A continuación se describe brevemente el método referido y el proceder en el estudio antes mencionado [5].

1.7.4.2. Metodología para la selección del punto de muestreo.

El propósito de una metodología es proveer de una guía para la localización de sitios de muestreo en los cuales se medirán los contaminantes del aire con el fin de regular sus emisiones. Este método es aplicable a flujos de gases a través de tuberías, conductos y chimeneas, el mismo se diseñó para contribuir a lograr mediciones representativas de las emisiones contaminantes.

El muestreo de los gases se realizará en un punto ubicado a una distancia de: al menos a 8 veces el diámetro de la chimenea antes del punto de liberación de los gases a la atmósfera; o dos veces el diámetro corriente arriba de cualquier perturbación del flujo de gases, tales como, cambios de dirección, reducción o expansión del conducto o desde una llama visible. Si es necesario se puede seleccionar una ubicación alternativa del punto de muestreo, pudiendo seleccionarse un punto ubicado a una distancia de: al menos dos veces el diámetro del conducto corriente abajo del punto de liberación de los gases a la atmósfera o a una distancia de la mitad del diámetro corriente arriba de cualquier perturbación del flujo [5].

1.7.4.3. Frecuencia para realizar la medición de las emisiones.

Para las instalaciones de generación eléctrica, debe existir un monitoreo continuo de las emisiones y adicionalmente realizar mediciones de comprobación al menos una vez al año. Los valores de emisiones máximas admisibles (independientemente de los valores establecidos en esta norma) podrán ser menores en determinadas instalaciones de acuerdo a la afectación o ubicación específica de la fuente de generación, previa consulta con los Órganos Regulatorios correspondientes (MINBAS, CITMA, MINSAP).

1.8. Metodología.

El procedimiento de análisis de escenarios integra valoraciones sobre la tecnología energética, los impactos sobre la calidad del aire, así como el nivel de población afectada por diferentes condiciones de calidad del aire. También incluye la valoración de posibles cambios o perturbaciones que inducidas sobre el escenario base conduzcan a reducir los impactos negativos, el sistema de análisis de escenarios y el procedimiento utilizado se ilustra en la figura 2.

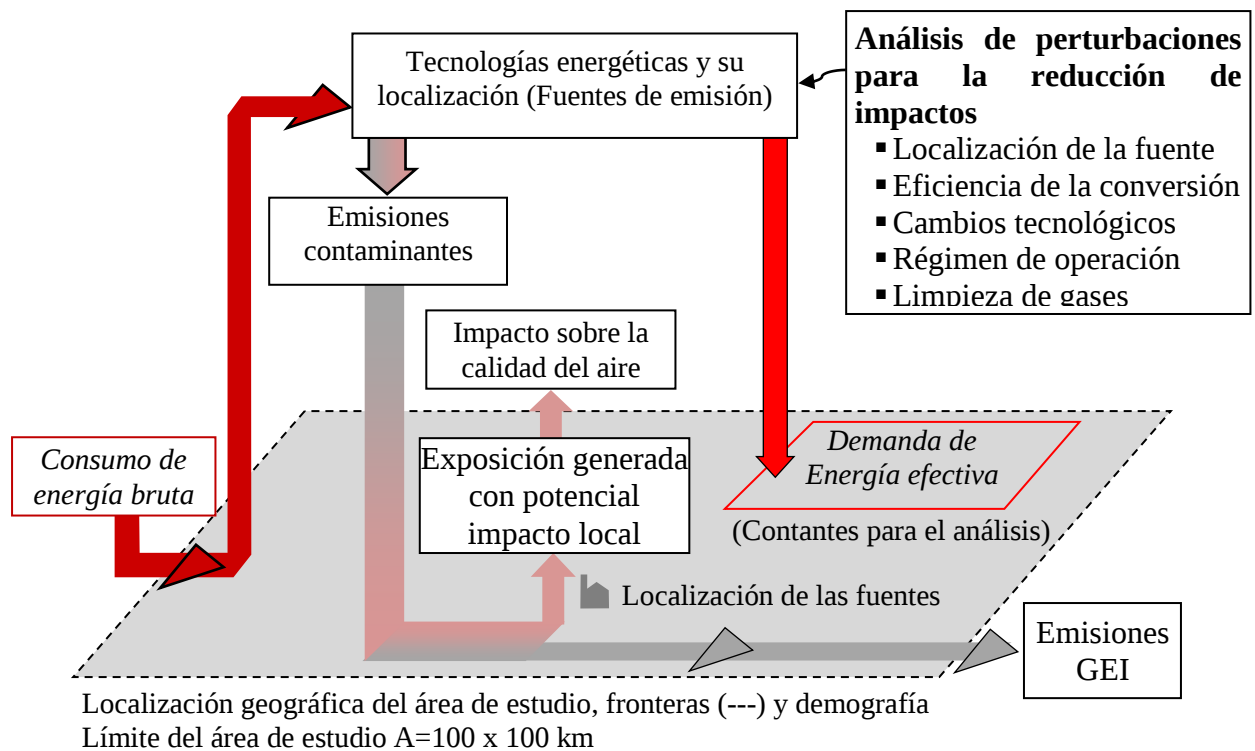
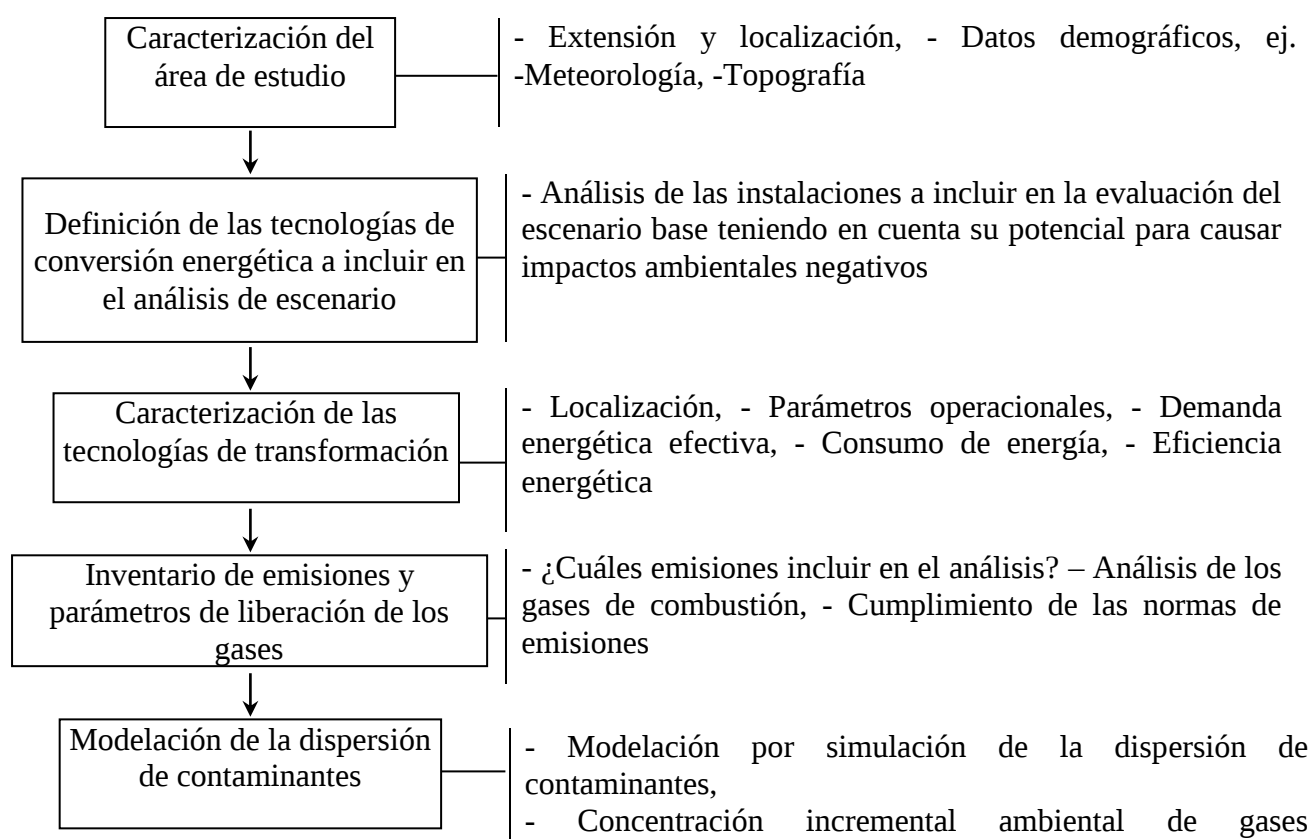


Figura 2. Sistema de análisis de escenarios [5].

Los principales pasos para realizar el análisis de escenarios energéticos se muestran a continuación en la tabla 5 esto nos da una representación de los límites del estudio desde la caracterización de las principales variables meteorológicas hasta la modelación de la dispersión de los gases.

Los pasos mencionados anteriormente describen el escenario base y n nuevos escenarios pueden ser inducidos posteriormente introduciendo perturbaciones. De esta manera, es posible evaluar los impactos debido a cambios o perturbaciones de variables como: La localización de las fuentes de emisión, variaciones en la eficiencia que modifiquen el consumo de energía bruta para cubrir la demanda neta de energía, las tasas y patrones de emisión de contaminantes y su impacto sobre la calidad del aire local así como las variaciones en los niveles de población afectada. El procedimiento para el análisis de escenarios se describe a continuación.

Tabla 5. Sistema de análisis de escenarios [5].



1.8.1. Caracterización del área de estudio y los límites.

Para la caracterización del área de estudio se debe tomar como punto de partida, la ubicación, la demografía, la meteorología y la topografía. La meteorología es un factor determinante en la dispersión de gases contaminantes. Los principales datos demográficos necesarios son: la población en el área de estudio, la distribución espacial de la población (una resolución recomendable es la población por 100x100m), y la mortalidad total en la muerte al año por cada mil habitantes. La topografía, puede afectar significativamente el patrón de dispersión de la pluma de descarga, por eso los modelos para el análisis de la dispersión de contaminantes incluyen algoritmos para dar cuenta de los efectos del terreno.

Las fronteras deben ser designadas para captar los impactos de la mejor forma posible. Para el presente trabajo se seleccionó un año como resolución temporal típica aunque se puede extender dependiendo de la disponibilidad de datos.

Las fronteras geográficas se evalúan dependiendo de la extensión y localización del área implicada, donde los efectos de la contaminación se asocian a la transformación energética por ciclos de combustión [5].

1.8.2. Definición de las instalaciones energéticas que se incluirán en el análisis de escenarios.

La definición de las instalaciones de energía a incluir en el análisis de escenarios depende del alcance definido. El alcance máximo es el que incluye todas las instalaciones de energía (fuentes de emisión) en el dominio del estudio, pero esto no es siempre necesario. A menudo se requiere para analizar sólo el escenario generado por un sector específico (por ejemplo, el sector de generación de energía), una instalación específica (por ejemplo, una nueva instalación) o un grupo de ellos como en el caso de estudio que se presenta. Algunos criterios pueden dar una idea previa de las instalaciones con el mayor potencial para causar impactos negativos, por ejemplo: La ubicación (instalaciones situadas cerca de zonas densamente pobladas podrían causar un alto impacto). El consumo de energía (un alto consumo de combustible implica mayores emisiones de gases a la atmósfera). Combustible (combustibles de baja calidad, como el carbón y el fuel oil, generan gases más contaminantes y por tanto un alto impacto).

1.8.3. Auditoría energética.

La auditoría energética constituye un paso de importancia significativa para evaluar la eficiencia de la transformación energética. Ésta constituye la herramienta base para identificar las principales pérdidas energéticas, y consecuentemente los principales potenciales de ahorro energético y económico. El mejoramiento de la eficiencia energética puede ser el aspecto más apropiado a realizar en un corto tiempo. A escala global, el mejoramiento de la eficiencia energética es la vía más satisfactoria para adaptar la civilización a la reducción de las fuentes energéticas y minimizar el daño al medioambiente.

En este análisis del sistema de auditoría energética debe incluir el análisis de los gases de combustión. Este es el factor clave para determinar las condiciones de combustión, la eficiencia y las pérdidas. El análisis de los gases hace posible determinar la eficiencia por método directo, el cual involucra el cálculo de todas las pérdidas específicas, se basa en balances de masa y energía; es un método apropiado para identificar las posibles causas de las pérdidas en calderas de vapor. El análisis de los gases de combustión incluye la determinación de las siguientes variables: Composición de los gases de salida (SO_2 , NO_2 , NO , CO , CO_2 , O_2), temperatura de los gases a la salida de la chimenea y el coeficiente de exceso de aire. Para determinar el flujo y la velocidad de los gases de salida así como la tasa de emisiones contaminantes se puede determinar mediante mediciones o la modelación de la reacción de combustión y realizando balances de masa y energía [5].

La auditoría energética y el inventario de emisiones se realizan en paralelo.

1.8.4. Inventario de emisiones.

Los inventarios de emisiones son una herramienta fundamental en la gestión de la calidad del aire local. Un inventario de las emisiones atmosféricas es una relación

de las fuentes de contaminación dentro del área geográfica en particular. El inventario incluye generalmente información sobre la cantidad de los contaminantes liberados por fuentes claves, el promedio de las emisiones de fuentes más pequeñas en toda el área. Para el procedimiento de análisis que se sugiere en este trabajo se requiere un inventario de emisiones con alta resolución geográfica y temporal de la fuente emisora en evaluación, principalmente basado en la tasa de consumo de combustible y el análisis de las emisiones gaseosas en el lugar específico, sin embargo el empleo del factor de emisión es necesario algunas veces debido a las limitaciones en la posibilidad de realizar mediciones.

Los contaminantes involucrados en este análisis son aquellos de mayor interés en la contaminación local (PM_{10} , SO_2 , NO_2 , CO). Para la evaluación, las emisiones contaminantes se deben determinar llevando a cabo mediciones de acuerdo a métodos establecidos por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés) y adoptadas por las Normas Cubanas para regular las máximas emisiones admisibles de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas de instalaciones de generación de vapor y electricidad [5].

1.8.5. Cálculo de las tasas de emisión usando factores de emisión.

En este caso resulta apropiado el uso de factores de emisión para estimar las tasas de emisión, señalando la responsabilidad del ingeniero en estar consciente de su aplicabilidad y limitaciones.

Existen factores de emisión disponibles para un gran número de procesos importantes en la base de datos FIRE de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, 2004), donde además se pueden consultar los diferentes métodos de determinación empleados. En el presente trabajo se emplea el factor de emisión dado para determinar las emisiones de PM_{10} , generadas por motores de combustión interna que usan diésel como combustible.

1.8.6. Cálculo de las tasas de emisión mediante mediciones.

Existen métodos de referencia establecidos para el monitoreo de las emisiones contaminantes, la EPA ofrece varias recomendaciones sobre que método usar en cada caso así como algunos métodos complementarios. Éstos fueron adoptados por las Normas Cubanas para regular las emisiones máximas admisibles de contaminantes a la atmósfera.

1.8.7. Cumplimiento de las Normas de emisión.

En Cuba, las emisiones gaseosas a la atmósfera por fuentes fijas se regulan por la Norma Cubana- TS 803:2010, esta norma establece los límites superiores de las emisiones contaminantes por fuentes fijas de instalaciones de generación de vapor y electricidad con el objetivo de proteger la salud humana y el medioambiente. Los límites superiores de las emisiones se expresan como concentraciones de los contaminantes en base a los gases secos liberados a la atmósfera desde fuentes estacionarias, estos se expresan en mg/Nm^3 , lo cual corresponde con el contenido

en peso del contaminante por unidad de volumen del gas seco liberado a la atmósfera en condiciones normales de temperatura y presión. De acuerdo a la norma referida anteriormente, los límites superiores de las emisiones deben ser controlados en la etapa operacional y tomados en consideración en la etapa de diseño de nuevas instalaciones energéticas.

1.8.8. Dispersión de contaminantes, determinación de la concentración de contaminantes.

La valoración de los impactos asociados a las emisiones de gases contaminantes originadas por ciclos de combustión conduce a modelar su dispersión. Para los contaminantes del aire, a excepción de los gases de efecto invernadero, es significativo conocer su dispersión en la atmósfera debido a importantes efectos, no despreciables, a escala local y regional.

Los modelos de dispersión atmosférica más importantes requieren no solo tener en cuenta el transporte físico de los contaminantes por la acción de los vientos, sino además sus transformaciones químicas. Sin embargo, la dispersión de contaminantes químicamente estables en la región de la emisión se puede predecir usando modelos de pluma Gaussiana. Estos modelos asumen que las emisiones contaminantes son transportadas por el viento en una línea continua, mientras se mezclan en la dirección horizontal y vertical con el aire circundante para producir concentraciones del contaminante con una distribución espacial normal (o Gaussiana). Para este estudio se evalúan mayormente efectos a escala local y las distancias siempre son mucho menores que 100 km por lo que se ha adoptado un modelo de pluma Gaussiana implementado en el software ISC-AERMOD View.

En este modelo la concentración está dada en función de las condiciones del terreno, la meteorología y los parámetros de emisión de la fuente (PEF). Los dos primeros factores, permanecen constantes pero los PEF pueden ser perturbados para modificar el efecto de las fuentes en la concentración resultante. Los PEF incluyen la localización de la fuente, altura de la chimenea, tasa de emisión, temperatura de los gases de salida, velocidad de salida de los gases y diámetro interior de la chimenea en el punto de liberación [1].

1.9. Software para la modelación de los contaminantes.

1.9.1. Descripción del modelo ISC3

El modelo ISC3 (Industrial Source Complex Model) para fuentes industriales, es un modelo de tipo Gaussiano en estado estacionario, el cual puede ser usado para modelar emisiones y evaluar la concentración de los contaminantes desde una amplia variedad de fuentes que pueden estar presentes en un complejo típico de fuentes industriales. Mediante la aplicación de este modelo se puede analizar lo siguiente: flujos de deposición seca y sedimentación de partículas, caída de flujo aerodinámico debido a la cercanía de edificios, fuentes puntuales, de área, línea y de volumen, ascenso del penacho [1] como una función de la distancia a favor del viento, separación de fuentes puntuales, y ajustes a terrenos limitados [14].

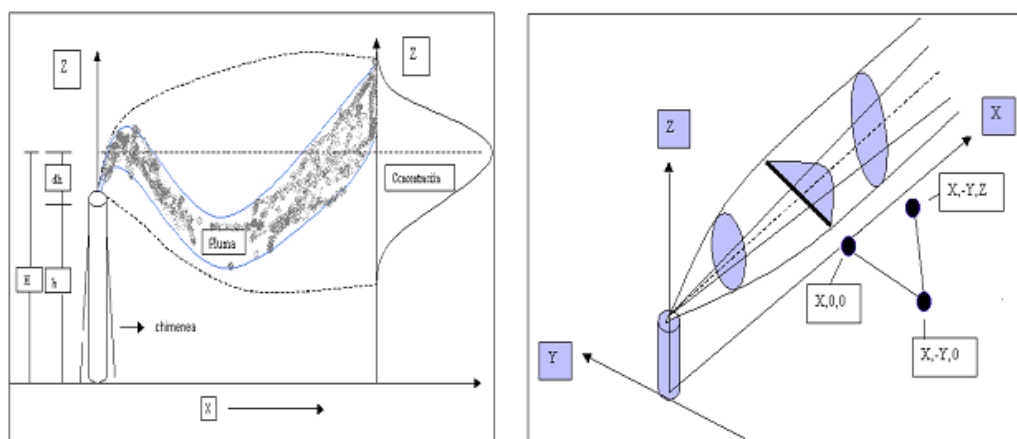
El ISC3 opera en dos modalidades: largo plazo (ISC3-LT, por la sigla en inglés Long Term) y corto plazo (ISC-ST). Esta última modalidad es la más factible de utilizar en el presente trabajo pues lo que se desea es realizar análisis en periodos cortos (horas o días).

1.9.2. Breve descripción del modelo ISCST3.

La base del modelo es la ecuación de penacho Gaussiana en estado estacionario lineal, la cual es usada con algunas modificaciones para modelar emisiones desde fuentes puntuales simples como chimeneas, emisiones desde chimeneas que experimentan caída de flujo aerodinámico cerca de edificios, conductos de ventilación, pilas de almacenamiento y bandas transportadoras, entre otras.

El ISC-ST acepta registros de datos meteorológicos horarios para definir las condiciones de ascenso del penacho, transporte, difusión y deposición. El modelo estima el valor de la concentración o deposición para cada combinación fuente y receptor en cada hora de entrada meteorológica y calcula los promedios a corto plazo que el usuario del modelo elija. Para valores de deposición, calcula el flujo de deposición seca, húmeda o total. También se tiene la opción de seleccionar promedios para todo el periodo de entradas meteorológicas [14]. La base del modelo es la ecuación de penacho Gaussiana en estado estacionario para una fuente continua. Para cada fuente y cada hora, el origen del sistema de coordenadas está ubicado en la base de la chimenea (superficie del suelo). El eje X es positivo en la dirección a favor del viento, el eje Y es normal al eje X y el eje Z se extiende verticalmente.

Las concentraciones que se calculan en forma horaria para cada fuente en cada receptor se suman para obtener la concentración (las unidades de salida de la concentración son microgramos por metro cúbico y de la deposición gramos por metro cuadrado) total producida en cada receptor por la combinación de las fuentes



[14].

Figura 3. Sistema de coordenadas del modelo gaussiano.

Capítulo 2. Impacto sobre la contaminación atmosférica de la generación diésel en Cayo Santa María.

2.1. Características generales de la instalación.

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



Figura 4. Localización de la Planta

2.1.1. Breve reseña histórica de la entidad.

Ante la situación del país, el Comandante en Jefe Fidel Castro Ruz lanza una estrategia de desarrollo turístico para aprovechar la belleza de nuestras playas, valores naturales y paisajes, así como la tradicional hospitalidad del pueblo cubano. Para esto se crea el pedraplén más largo del país, para comenzar a desarrollar el turismo, el polo turístico que comenzaba a desarrollarse necesitaba de un abastecedor de corriente eléctrica, por lo que es imprescindible la creación de la UEB Cayo Santa María, inaugurada el 24 de octubre de 2001 subordinada a la UNE. En sus inicios la plana solo contaba con 3 motores CUMMINGS para cubrir la demanda de su único cliente Hotel Meliá Cayo Santa María, con la apertura de nuevos Hoteles la demanda aumenta por lo que es necesario aumentar la potencia disponible para proporcionarle una mayor confiabilidad al sistema y para cubrir el aumento de la demanda. Con este aumento de la demanda se decide introducir una nueva tecnología, se realiza la instalación de nuevos motores MTU, de nacionalidad Alemana. El desarrollo del polo turístico continua con nuevas edificaciones Hoteleras, entre otros proyectos, a partir del 2007 se realiza un proceso inversionista para la instalación de una nueva tecnología (MAN), que trajo consigo un aumento de la capacidad de generación y disminución del costo de generación, pues se comenzó a trabajar con un combustible mucho más barato que el Diésel, el fuel oil. Se comenzó la instalación de 2 máquinas MAN, con una potencia de 3,85 MW para un total de 7,57 MW. Desde el año 2010 ya se estaban desmontando los motores “CUMMINGS” (fuera de servicio desde principios del 2007) y para inicio del año 2011 se inicia el proceso de inversión que abarca la instalación de 4 motores “HYUNDAI” en el área que ocupaba la nave de los motores CUMMINGS.

Debido a la necesidad de asegurar el combustible de estos motores y a los altos índices de consumo de combustible se edificó una nave de tratamiento de combustibles en la que se instaló un sistema de depuradoras, se construyó además una isla de combustibles para el almacenamiento y la recepción de los mismos donde quedaron instalados 2 tanques (verticales) de recepción de Fuel de 700 m³ cada uno; así como 3 tanques (horizontales) para el almacenamiento de combustible Diésel de 95 m³ cada uno y 2 para el Fuel de igual capacidad, además otros tanques horizontales para lubricantes y uno para el lodo residual. La central está capacitada para el análisis de combustibles, cuenta con un laboratorio en el cual se realizan varias pruebas a los combustibles que allí se reciben. En la tabla 6 se muestra la capacidad de generación de la planta desde su creación [15].

2.1.2. Objeto Social de la Unión Eléctrica.

- Generar, transmitir, distribuir y comercializar de forma mayorista energía eléctrica en divisa y de forma minorista en moneda nacional.
- Prestar servicios de proyecto y de ingeniería de construcción, desmantelamiento, montaje, reparación y mantenimiento a instalaciones eléctricas y aéreas soterradas al sistema de la Unión Eléctrica.

- Realizar trabajos de corrección del factor de potencia, acomodo y control de carga.
- Brindar servicios técnicos relacionados con el uso eficiente de la energía eléctrica.
- Brindar servicios de alquiler, montaje y mantenimiento a grupos electrógenos.
- Ofrecer servicios de reparación y mantenimiento de equipos estáticos y rotatorios eléctricos.
- Realizar proyectos de electrificación, mejoras y modernización de redes eléctricas así como de iluminación exterior e interior.
- Brindar servicios de reparación, mantenimiento, calibración de equipos y medios de medición.

Tabla 6. Capacidad de generación de la planta desde su creación [15].

Año	Inversión	Capacidad instalada (MW)	Capacidad Disponible (MW)	Máxima demanda (MW)
2001	3 Máquinas "CUMMINGS"	2.762	2.072	0.20
2003	2 Máquinas "CUMMINGS"	5.562	4.172	2.80
2005	2 MTU	9.338	7.0	3.10
2006	1 MTU	11.226	8.42	4.23
2007	2 MTU	15.02	11.25	5.30
2008	2 grupos MAN	17.180	13.4	5.76
2010	2 MTU	20.916	16.2	8.58
2012	1 MTU	22.804	17.6	13.56
2013	4 Hyundai	29.604	22.615	13.56

Actualmente la planta cuenta con 4 motores Hyundai, 2 motores MAN los cuales consumen combustible fueloil y 8 MTU que consumen diésel.

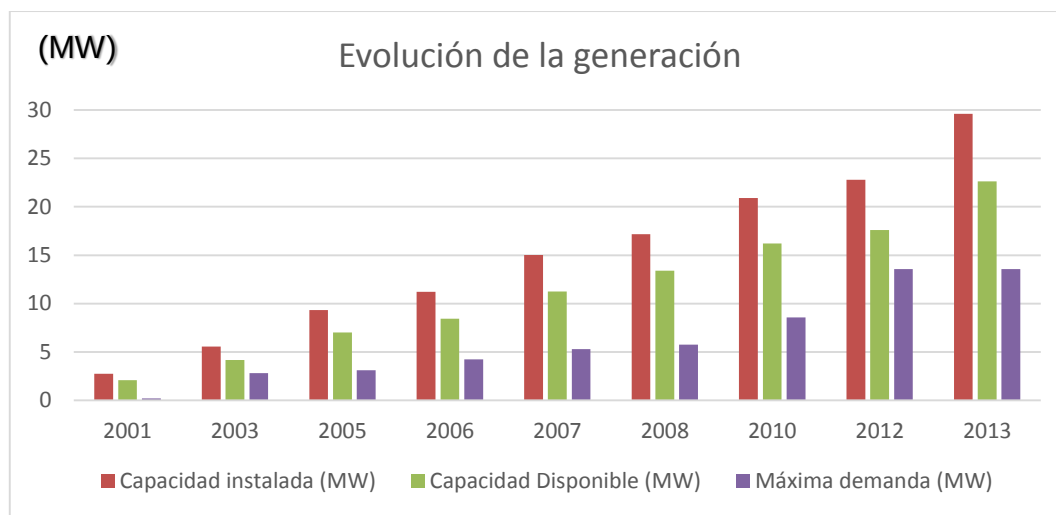


Figura 5. Evolución de la capacidad de generación de la planta desde su creación.

2.2. Característica técnica de los grupos electrógenos.

2.2.1. Breve descripción de un grupo electrógeno.

Un grupo electrógeno es una máquina que mueve un generador eléctrico a través de un motor de combustión interna. Son comúnmente utilizados cuando hay déficit en la generación de energía eléctrica de algún lugar, o cuando son frecuentes los cortes en el suministro eléctrico. Así mismo, la legislación de los diferentes países pueden obligar a instalar un grupo electrógeno en lugares en los que haya grandes densidades de personas (centros comerciales, restaurantes, cárceles, edificios administrativos...) Una de las utilidades más comunes es la de generar electricidad en aquellos lugares donde no hay suministro eléctrico, generalmente son zonas apartadas con pocas infraestructuras y muy poco habitadas. Otro caso sería en locales de pública concurrencia, hospitales, fábricas, etc., que a falta de energía eléctrica de red, necesiten de otra fuente de energía alterna para abastecerse [16].

Motor de combustión interna.: Un motor de combustión interna, motor a explosión o motor a pistón, es un tipo de máquina que obtiene energía mecánica directamente de la energía química de un combustible que arde dentro de una cámara de combustión. Su nombre se debe, a que dicha combustión se produce dentro de la máquina en sí misma [16].

Generador: Un generador eléctrico es todo dispositivo capaz de mantener una diferencia de potencial eléctrico entre dos de sus puntos (llamados polos, terminales o bornes) transformando la energía mecánica en eléctrica. Esta transformación se consigue por la acción de un campo magnético sobre los conductores eléctricos dispuestos sobre una armadura (denominada también estator). Si mecánicamente se produce un movimiento relativo entre los conductores y el campo, se generará una fuerza electromotriz (F.E.M.) [16].

2.3. Principales parámetros de los grupos electrógenos (16v-4000).

En la siguiente tabla se muestra un resumen de las principales características del motor, el generador y del sistema de lubricación.

Tabla 6. Características del motor 16v 4000 [16].

Equipo	Ítem	Especificación
Motor 16V 4000	Velocidad\ Potencia máxima	1800rpm\1990kW
	Diámetro del cilindro\ Carrera	165mm\190mm
	Presión de compresión	24-28 bar
	Peso del motor seco\longitud del motor	6950kg\2880mm
Generador	Tipo	MJB 500 MB 4
	Voltaje\ Potencia	480 V\2360 kW
	Frecuencia\ No. de polos	60 Hz\4
	Peso promedio	4400kg

2.4 Esquema de distribución del combustible diésel.

En el presente esquema se ilustra el flujo de Diésel desde su recepción hasta las líneas de consumo de los motores. El combustible se obtiene de dos proveedores distintos uno desde Cienfuegos y el otro desde La Habana. Las pipas de combustible se conectan a las bombas centrífugas de descarga las cuales son operadas manualmente por los operarios con destino a los tanques (A, B, C) antes pasando por un flujómetro. El tanque C es de reserva para casos de emergencias, A y B son los de uso de los motores. La planta tiene parte de su funcionamiento digitalizada contando con bombas centrífugas automáticas las cuales son accionadas al arrancar los motores. El combustible antes de ser utilizado es filtrado para impedir que pasen impurezas a la cámara de combustión [17].

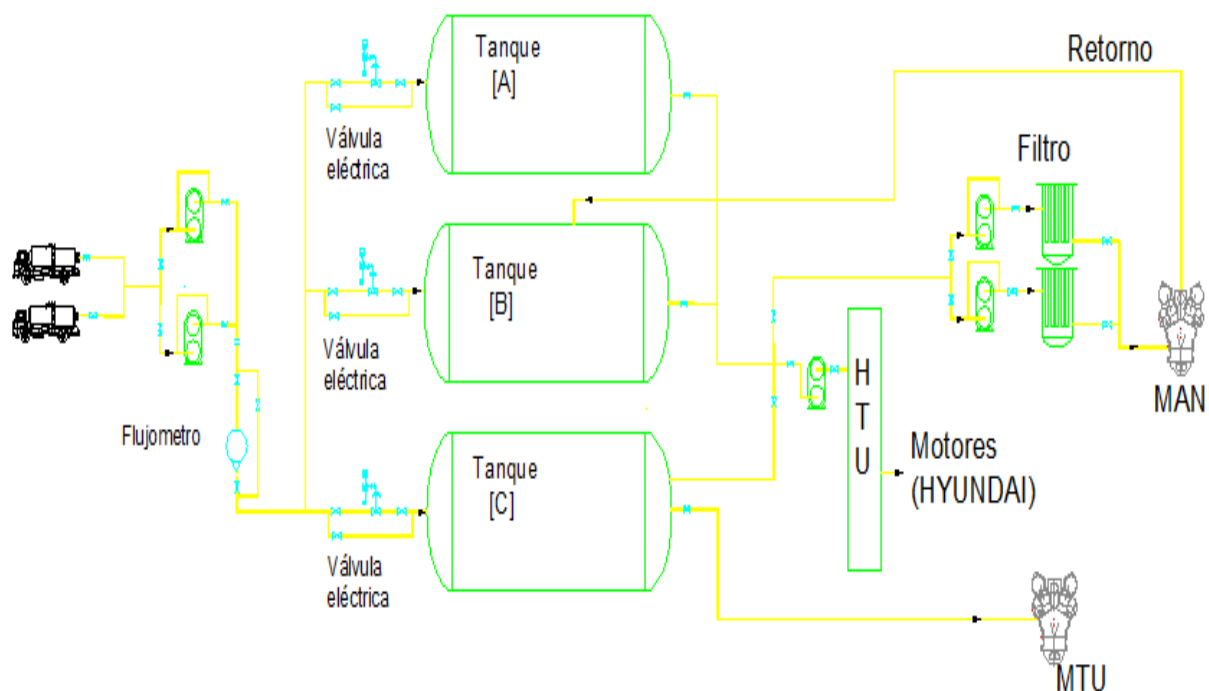


Figura 6. Flujo de diésel [17].

2.5. Consumo de combustible.

El consumo de combustible es un parámetro al cual se le presta especial interés, el deterioro del índice de consumo (relación entre el combustible por kW/h generado) es un indicador del estado técnico de la tecnología y de lo adecuado o no que pueda ser el régimen de explotación. El principal objeto de atención lo constituye la tecnología diésel, conformada por las unidades de generación MTU de procedencia alemana.

La central es gran consumidora de combustible por lo que necesita tanques lo suficientemente grandes para su almacenamiento, de diésel se almacenan 284306 litros y de fuel oil 581433 litros.

En la tabla 8 se presenta el consumo de combustible (diésel) por mes, el consumo total en litros/mes y en ton/mes para el año 2013.

Tabla 8. Consumo de diésel por mes 2013 [17].

Meses	litros	Toneladas
Enero	398460	340.43
Febrero	436773	373.65
Marzo	844854	720.23
Abril	1078608	921.41
Mayo	705928	603.09
Junio	510178	436.40
Julio	278090	237.80
Agosto	434227	369.22
Septiembre	221971	141.26
Octubre	258858	219.56
Noviembre	183655	156.402
Diciembre	548726	115.657
Total	5351602	4635.11

En el figura 7 se expresan los valores de la tabla 9 en forma de gráfica donde se pueden apreciar con mayor claridad los meses de mayor consumo de combustible.

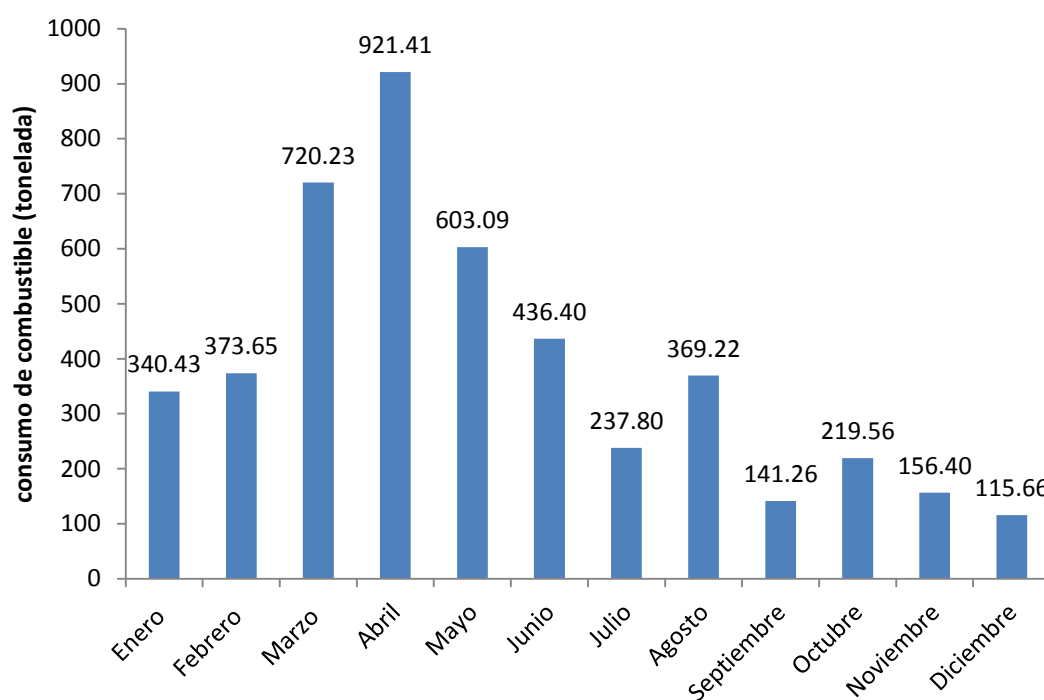


Figura 7: Consumo de combustible [17].

Como se puede apreciar en el gráfico los meses de mayor consumo de combustible son: marzo, abril, mayo y junio. En esta época del año la demanda aumenta con el crecimiento de los visitantes a los distintos polos turísticos de la cayería norte. Por lo cual hay un aumento del consumo de combustible considerable.

2.6. Resumen del régimen de carga del 2013. (MTU)

Para el análisis del régimen de carga de los motores se realizaron histogramas a partir de una recopilación de datos sobre el control de la demanda horaria desde la hora 1 del mes de enero hasta la hora 24 del mes de diciembre con lo que se realizaron diferentes gráficos que muestran las variaciones de carga para estos motores.

A continuación en la tabla 9 se muestra un resumen por cada motor del régimen de carga para el año 2013 y un gráfico (histograma de frecuencia) herramienta que nos muestra con gran claridad los resultados obtenidos para el período analizado. Este trabajo tiene como bases una gran manipulación de datos para obtener estos resultados.

Tabla 9: Resumen del régimen de carga por motor para el año 2013 [18].

% de carga	% de frecuencia							
	MTU 1	MTU 2	MTU 3	MTU 4	MTU 5	MTU 6	MTU 7	MTU 8
Apagado	74.6%	80.0%	74.6%	71.7%	73.3%	81.7%	81.2%	87.5%
5	0.1%	0.1%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
10	2.8%	2.6%	2.2%	3.0%	2.7%	1.6%	2.0%	1.3%
20	0.0%	0.0%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
30	0.0%	0.1%	0.1%	0.0%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%
40	0.1%	0.0%	0.1%	0.2%	0.2%	0.1%	0.1%	0.0%
50	0.2%	0.3%	0.4%	0.1%	0.4%	0.1%	0.3%	0.1%
60	0.7%	0.7%	1.2%	0.9%	1.1%	0.9%	0.8%	0.5%
70	5.3%	4.5%	5.6%	5.8%	6.0%	4.2%	5.0%	3.5%
80	16.2%	11.8%	15.7%	18.0%	16.1%	11.2%	10.5%	7.0%
90	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
y mayor...	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Total	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%

Como se puede apreciar en la tabla 9 y la figura 8 la mayor parte del tiempo estos motores permanecen apagados ya que la mayor parte de la demanda la cubren los motores MAN y HYUNDAI los cuales trabajan con combustible fueloil, un combustible más contaminante que el diésel pero de menor costo. Estos motores tienen un sistema de encendido pausado debido a que deben alcanzar una temperatura óptima de trabajo, por eso es que en las gráficas anteriores se observa en todos los motores un pequeño por ciento del tiempo de operación a una carga de 10%. El porcentaje de carga más frecuente al que trabajan los motores está en el rango de 70% y 80% lo que indica que las mediciones de gases se deben realizar en estos rangos. También se debe medir el consumo de combustible para estos regímenes de carga. Para así poder tener un mayor número de factores en

consideración a continuación se muestra en la figura 9 un resumen de la variación de la carga para las 8760 horas que componen un año.

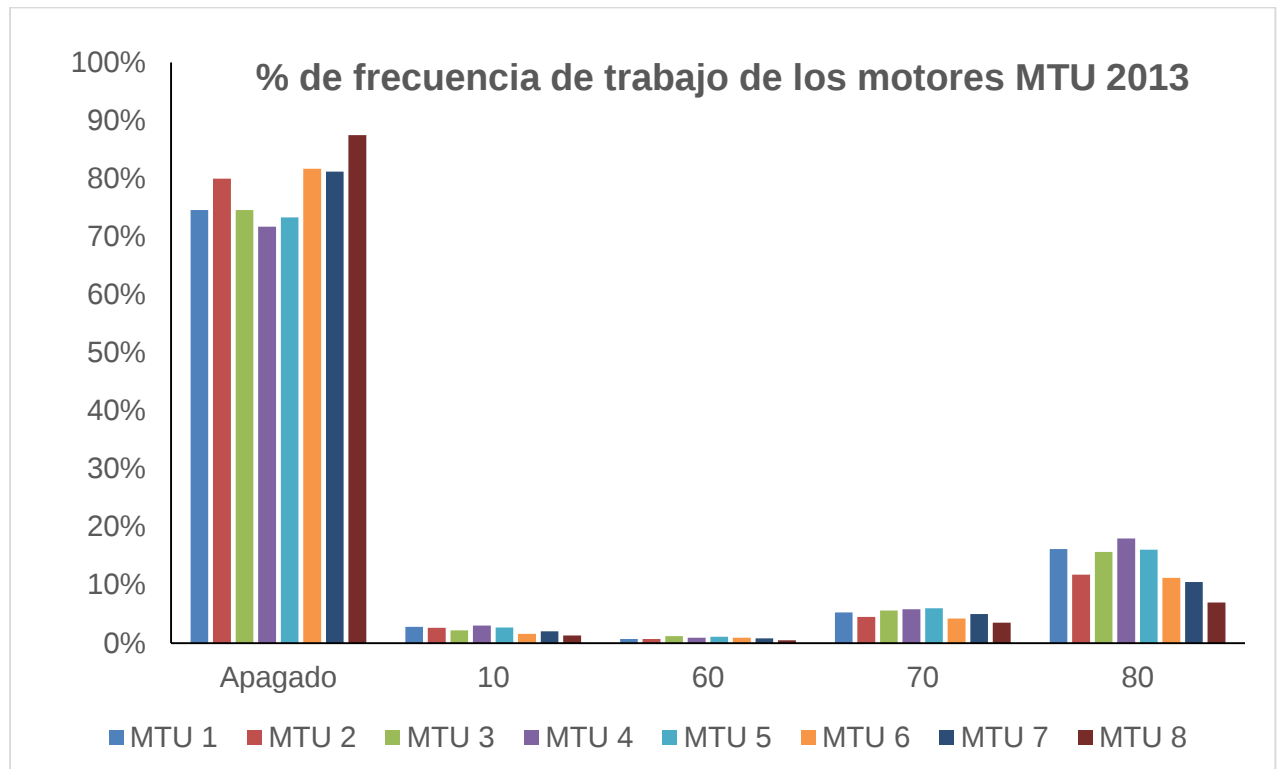


Figura 8. Cargas de trabajo más frecuentes del año 2013 [18].

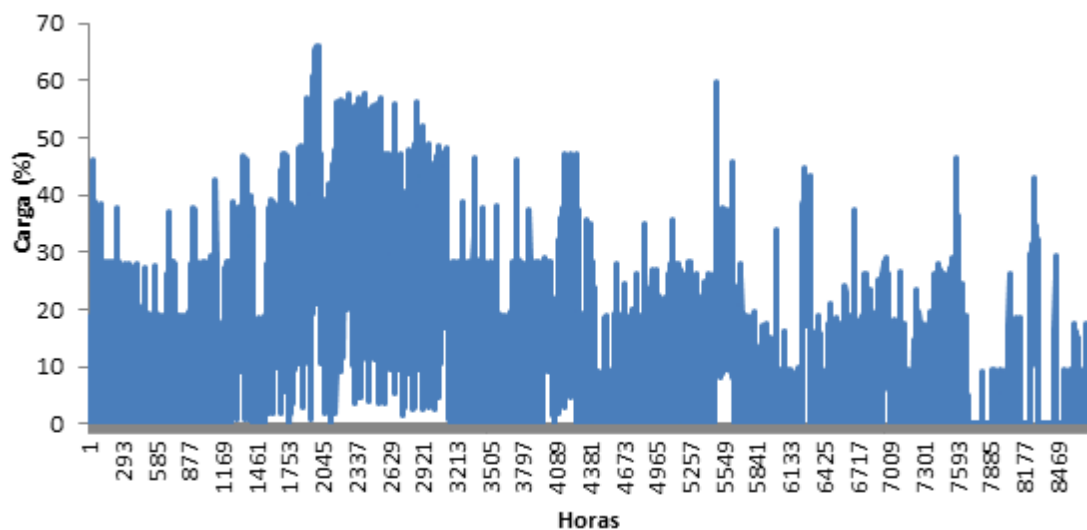


Figura 9. Variación horaria de la carga año 2013 [18].

2.7. Valoración de la eficiencia y el consumo de combustibles en las unidades generadoras diésel.

Un tema medular en cualquier instalación de transformación energética es la eficiencia; del valor de este parámetro dependerá la energía primaria requerida para

satisfacer la demanda. Por otra parte en la medida que se demande mayor cantidad de energía los volúmenes de gases emitidos a la atmósfera serán mayores con el consecuente incremento del impacto ambiental.

En Tabla 10 se muestran los parámetros de operación determinados como típicos para los moto-generadores diésel que se encuentran en operación en la central. Estos parámetros fueron determinados a partir de la bases de datos de la central. Los parámetros para las plantas a partir de extrapolar el comportamiento típico a todos los motores se muestran en la Tabla11 [17].

Tabla 10. Parámetros típicos de una unidad de generación.

Motor	Combustible		Consumo específico al factor de carga dado			Eficiencia (%)	Factor de carga	P.máx. (MW)
	Tipo	VCN (MJ/kg)	(g/kWh)	(kWh _f / kWh _e)	(kg/h)			
MTU 16V4000	Diésel	42.8	230	2.73	310.5	37	0.75	1.99

VCN: Valor calórico neto

Tabla 11. Parámetros de operación para la generación diésel Cayo Santa María.

Potencia instalada (MW)	Combustible		Horas-planta/año en operación	Energía neta generada (MWh/año)	Eficiencia (%)
	tipo	Demanda, (ton/año)			
15.1	Diésel	4635	16151	74,205,266	37

Como se puede apreciar en la tabla 11 la eficiencia calculada de los motores MTU es aproximadamente de un 37%. Este valor puede considerarse apropiado para este tipo de tecnología.

2.8. Emisiones y modelación de la dispersión de contaminantes.

2.8.1. Determinación de las emisiones de gases contaminantes.

Las tasas de emisión y el inventario de emisiones son fundamentales en este trabajo. En la práctica se determinan de dos formas: una mediante la extrapolación de mediciones realizadas en la Planta Santa Clara Industrias Diésel, con igual tecnología a la instalada en la planta Cayo Santa María y que se explota en condiciones semejantes, y otra utilizando factores de emisión en función del tipo de combustible y la tecnología.

2.8.2. Cálculo de las tasas de emisión usando factores de emisión.

Aunque se prefiere la medición en lugar del cálculo usando factores de emisión no siempre es posible debido a las limitaciones de recursos, en este caso resulta apropiado el uso de factores de emisión para estimar las tasas de emisión, señalando la responsabilidad del ingeniero en estar consciente de su aplicabilidad y limitaciones. Existen factores de emisión disponibles para un gran número de procesos importantes en la base de datos FIRE de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, donde además se pueden consultar los diferentes métodos usados para determinarlos. En este caso se usa el factor de emisión dado

para determinar las emisiones de PM₁₀ generadas por motores de combustión interna que usan diésel como combustible, el valor se muestra en la tabla 12.

Tabla 12. Factor de emisión para PM₁₀ [19]

Fuente de emisión	Tipo de combustible	Valor (g/kg diésel)
Motor de combustión interna	Diésel	1.95

2.8.3. Cálculo de las tasas de emisión mediante mediciones.

Existen métodos de referencia establecidos para el monitoreo de las emisiones contaminantes, la EPA ofrece varias recomendaciones sobre que método usar en cada caso así como algunos métodos complementarios. Los métodos que se utilizaron en este trabajo son para el dióxido de azufre el método 6C, para los NO_x el 7E y para el CO el 10 [19].

2.8.3.1. Equipamiento, mediciones y nivel de emisiones, cumplimiento de la NC TS 803: 2010.

El analizador de gases empleado en las mediciones fue el ECOM-SG-Plus, el cual fue diseñado para una amplia gama de aplicaciones tales como el monitoreo de las emisiones contaminantes, el control de la reducción de emisiones por la instalación de dispositivos, el monitoreo de la eficiencia de la combustión y la fiabilidad de las instalaciones con ciclos de combustión.

Con este analizador se puede medir la concentración en los gases de salida de O₂, CO, NO, NO₂, SO₂ e hidrocarburos en formas cuasi-continuas o de manera automática en secuencias programadas y cumple con los requisitos que requieren los métodos de medición de la EPA 6C, 7E y 10 [20]. Las características del instrumento se pueden ver en la tabla 13.



Figura 10. Analizador de gases de la combustión, ECOM-SG PLUS

Tabla 13. Características del analizador de gases ECOM-SG-Plus [20]

Variable	Rango de medición	Precisión	Resolución	Principio de medición
O ₂	0-25 %	5 % (1,25 %)* [2 % (0,1 %)]	0,1 %	Sensor electroquímico
CO	0-4000 ppm	5 % (200 ppm)* [2 % (16 ppm)]	1 ppm	
NO	0-2000 ppm	5 % (100 ppm)* [2 % (8 ppm)]	1 ppm	
NO ₂	0-2000 ppm	5 % (10 ppm)* [2 % (1 ppm)]	1 ppm	
SO ₂	0-4000 ppm	5 % (200 ppm)* [2 % (16 ppm)]	1 ppm	
Gas Temp	0-999 °C	2 % (20 °C)*	1 °C	Termopar
Amb. Temp	0-99 °C	2 % (2 °C)*	1 °C	

Nota: Valor referido a la escala fondo, Valor Referido al 20 % de la escala.

El resultado del análisis de los gases emitidos en la central Santa Clara Industrial Diésel se reportan en la tabla 14, las mediciones se realizaron al 75 % de carga, siendo este régimen de operación representativo para las unidades de generación instaladas en ambas centrales. Se realizaron 10 réplicas de mediciones en tres motores y se analizó la variabilidad de los resultados, comprobándose su similitud. A partir del análisis mencionado anteriormente se completaron los datos que se muestran en la tabla 14.

Tabla 14. Resultados de las mediciones en las platas a un factor de carga de 0.75

Parámetro	Valor medido										Promedio	DE
Réplica	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
T Gas (°C)	471.41	473	473	472	474	472	472	472	474	472	472.5	0.91
O ₂ , (%)	9.6	9.8	9.8	9.7	9.9	9.9	9.8	9.9	9.8	9.8	9.8	0.09
CO, (ppm)	489	478	485	477	480	472	480	470	483	469	478.3	6.53
NO, (ppm)	784	779	789	787	789	788	791	780	774	790	785.1	5.67
NO ₂ , (ppm)	10	11	9	10	11	9	10	11	9	10	10.0	0.82
NO _x , (ppm)	794	790	798	797	800	797	801	791	783	800	795.1	5.67
SO ₂ , (ppm)	76	74	73	74	73	76	74	76	74	76	74.6	1.26
CO ₂ , (%)	8.4	8.2	8.2	8.3	8.1	8.1	8.2	8.1	8.2	8.2	8.2	0.07
α	1.79	1.82	1.82	1.80	1.84	1.84	1.82	1.84	1.82	1.82	1.82	0.02

Para el SO₂, los NO_x y el PM₁₀ los máximos niveles de emisión determinados se comparan con los niveles de emisión permisibles que establece la norma cubana NC-TS 803: 2010, [21]. Los valores medidos y los tomados de la base de datos fueron corregidos para expresarlos en las unidades de medida que establece la NC-TS 803: 2010 utilizando el procedimiento que establece la misma.

Se determinó que los niveles de emisión en las chimeneas se encuentran por debajo del límite máximo permisible que establece la norma al respecto, como se puede apreciar en la tabla 15.

Tabla 15. Niveles de emisión, valores determinados vs límites establecidos por NC-TS 803: 2010.

Fuentes	Chimeneas	Emisiones, mg/Nm ³		
		SO ₂	NO _x	PM ₁₀
MTU diésel	desde 1 a 3	113	946	155
NC-TS 803: 2010		1000	2000	80

Nota: Los valores en la tabla están referidos a 273.15 K y 101.325 kPa de gases secos con 15 % O₂ de referencia.

2.8.4. Tasas de emisión e inventario de emisiones.

Para el cálculo de las tasas de emisión se parte de los parámetros típicos de operación de los motores y las emisiones como son: el exceso de aire, el consumo de combustible, la concentración de contaminantes en los gases de escape y su temperatura.

Las tasas de emisión, el flujo de gases y su velocidad de salida se determinaron a partir de los parámetros antes mencionados y mediante la modelación de la reacción de combustión y balances de masa. Los valores para el caso que se estudia se presentan en la tabla 16.

Tabla 16. Parámetros de salida de los gases.

Variable	Valor
Velocidad de salida (m/s)	32
Tasa de emisión NO _{2eq} (g/s)	1.18
Tasa de emisión SO ₂ (g/s)	0.36
Tasa de emisión CO (g/s)	1
Tasa de emisión PM ₁₀ (g/s)	0.17
Temperatura (K)	745 (473 °C)

2.8.5. Inventario de emisiones.

La estimación de las emisiones de gases es un factor importante para conocer el grado de contaminación del aire usado por una determinada fuente. Con estas estimaciones podrán realizarse investigaciones para determinar los niveles de contaminación atmosférica. En la tabla 17 se muestra el factor de emisión calculado para un motor MTU, teniendo en cuenta que el PM₁₀ se tomó de un factor de emisión del cual se hizo referencia anteriormente, los demás contaminantes fueron calculados mediante la extrapolación de datos de mediciones anteriormente realizadas en la ciudad de Santa Clara.

Tabla 17. Factores de emisión

Factores de emisión Diésel quemado en un MCI (calculado)				
g/kg comb				kg/kg comb
*PM ₁₀	SO ₂	NO _x	CO	CO ₂
1.95	4	21	12	3.1

* Tomado de base de datos FIRE de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos [19].

En la tabla 18 se muestra un inventario de emisiones por mes para cada uno de los diferentes contaminantes emitidos a la atmósfera como consecuencia de la quema de combustible diésel.

Tabla 17. Emisiones de gases contaminantes.

Mes	Consumo Diésel	Emisiones de gases contaminantes (Ton)				
		PM ₁₀	SO ₂	NO _x	CO	CO ₂
Enero	340	0.7	1.4	7.1	4.1	1054
Febrero	374	0.7	1.5	7.9	4.5	1159
Marzo	720	1.4	2.9	15.1	8.6	2232
Abril	921	1.8	3.7	19.3	11.1	2855
Mayo	603	1.2	2.4	12.7	7.2	1869
Junio	436	0.9	1.7	9.2	5.2	1352
Julio	238	0.5	1.0	5.0	2.9	738
Agosto	369	0.7	1.5	7.7	4.4	1144
Septiembre	141	0.3	0.6	3.0	1.7	437
Octubre	219	0.4	0.9	4.6	2.6	679
Noviembre	156	0.3	0.6	3.3	1.9	484
Diciembre	115	0.2	0.5	2.4	1.4	357
Total	4632	9.0324	18.528	97.272	55.584	14359.2

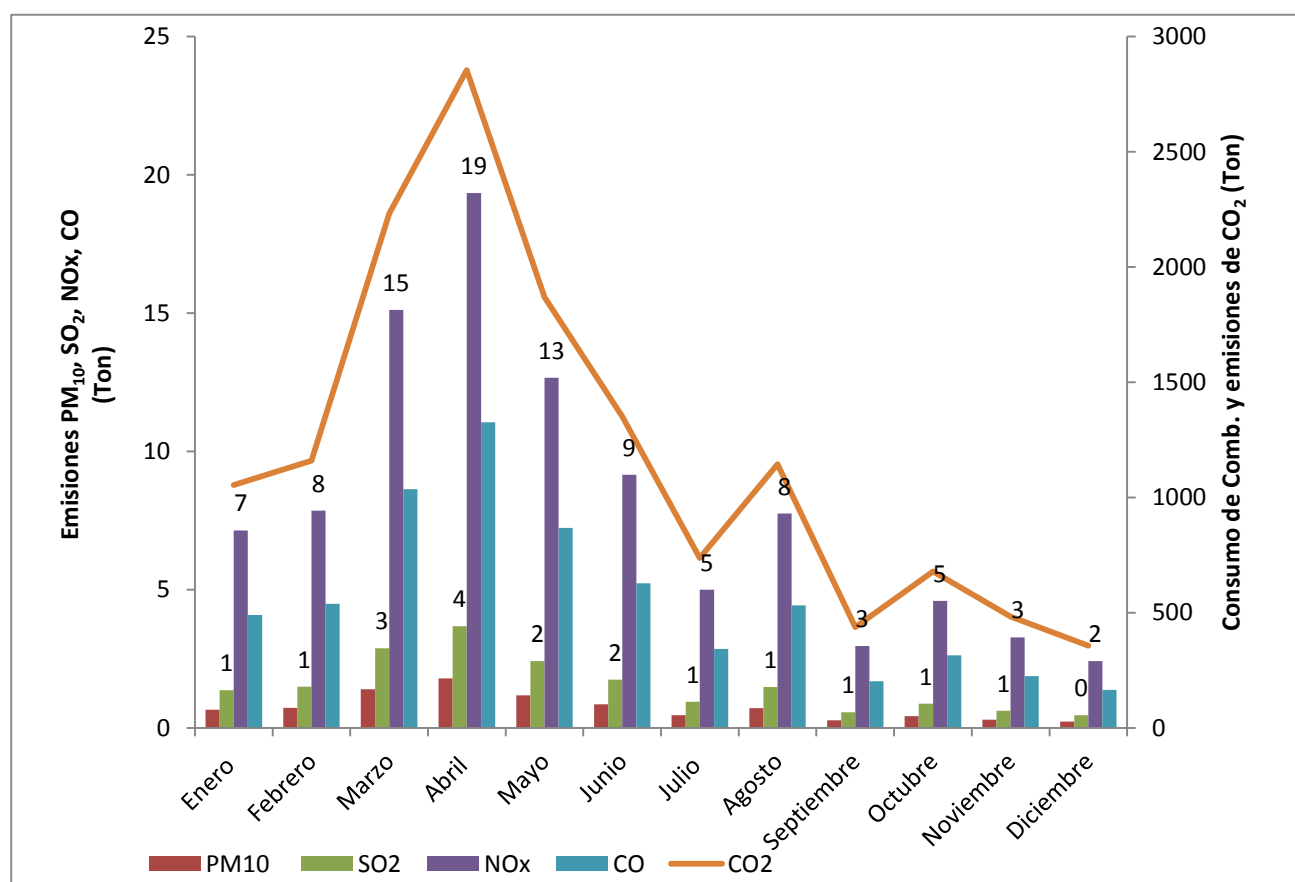


Figura 11. Emisiones de gases contaminantes.

2.9. Variables meteorológicas.

La UEB Cayo Santa María es el área geográfica donde el presente estudio se llevó a cabo; es uno de los principales polos turísticos de Cuba, localizado en el municipio de Caibarién. Cuenta con un clima tropical, estacionalmente húmedo, con influencia marítima. La Figura 12 muestra la rosa de los vientos características de esta zona.

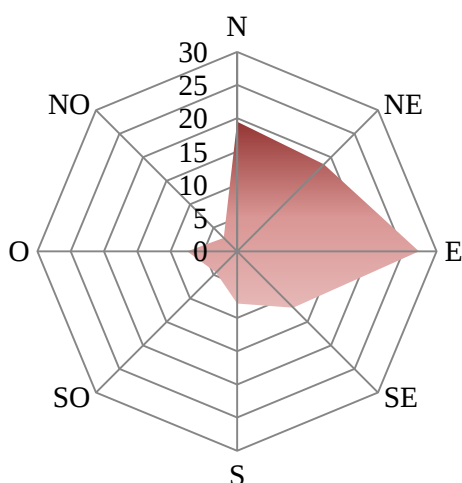


Figura 12. Rosa de los vientos. Elaboración propia con datos de [22].

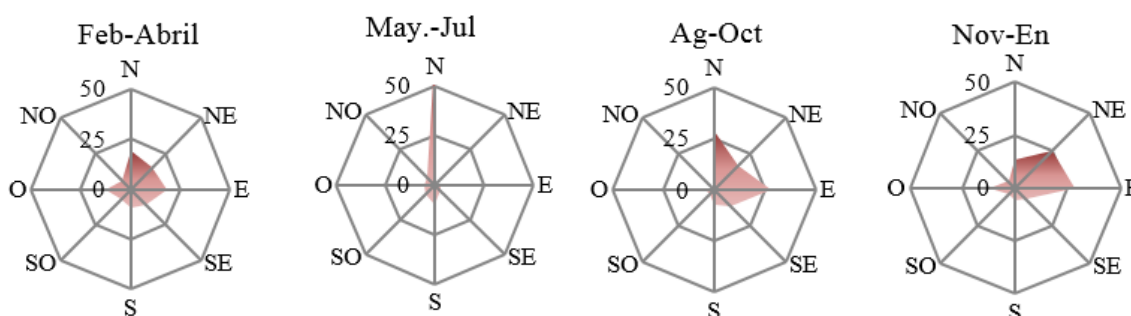


Figura 13. Resumen trimestral de la rosa de los vientos.

La Meteorología y la topografía son factores determinantes en la dispersión de gases contaminantes, y se requieren datos detallados de estos elementos para el modelado. Las concentraciones a nivel del suelo de contaminantes son controladas principalmente por dos elementos meteorológicos: dirección y velocidad del viento (para el transporte), y la turbulencia y la mezcla de altura de la capa límite inferior (por dispersión). Para este trabajo se obtuvieron datos meteorológicos por hora durante un año, ha sido proporcionada por el Centro Meteorológico de Villa Clara [22], este archivo incluye la dirección y velocidad del viento, temperatura del medio ambiente y altura de mezclado.

Aquí se puede apreciar claramente que los vientos batan con mayor frecuencia en la dirección Este (E) alrededor del 27% del tiempo, en dirección Norte (N) 19%, y dirección Noreste (NE) 17% del tiempo. Para el período que se analiza se brinda en

la figura 13 un resumen trimestral de la rosa de los vientos y en la figura 14 la velocidad del viento promedio mensual.

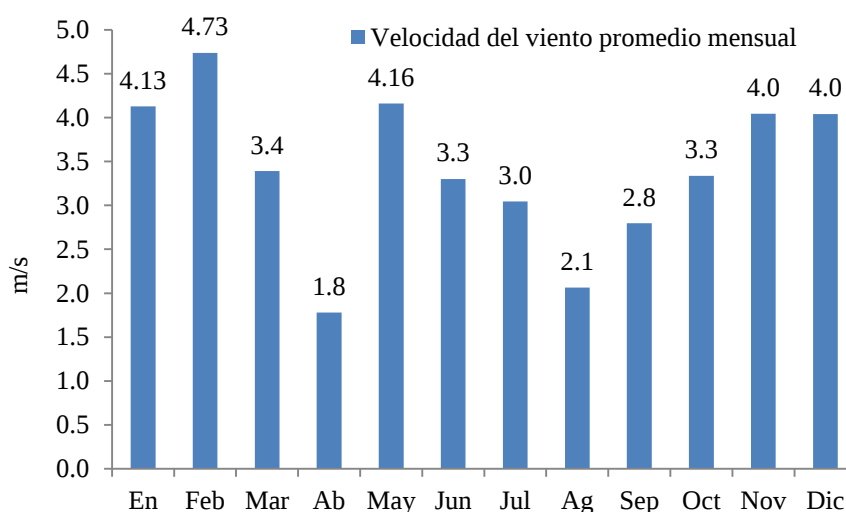


Figura 14. Velocidades del viento promedio mensual.

2.10. Modelación de la dispersión de contaminantes.

2.10.1. Descripción del modelo utilizado.

La valoración de los impactos asociados a las emisiones de gases contaminantes originadas por ciclos de combustión conduce a la modelación de la dispersión de las emisiones. Generalmente para los contaminantes del aire, a excepción de los gases de efecto invernadero, es significativo conocer su dispersión en la atmósfera desde cientos a miles de kilómetros debido a importantes efectos no despreciables a escala local y regional.

Los modelos de dispersión atmosférica más importantes requieren no solo tener en cuenta el transporte físico de los contaminantes por la acción de los vientos, sino además sus transformaciones químicas. Sin embargo, la dispersión de contaminantes químicamente estables en la región de la emisión se puede predecir usando modelos de pluma Gaussiana. Estos modelos asumen que las emisiones contaminantes son transportadas por el viento en una línea continua, mientras se mezclan en la dirección horizontal y vertical con el aire circundante para producir concentraciones del contaminante con una distribución espacial normal (o Gaussiana). El uso de estos modelos se limita típicamente a ser aplicable en distancias de 100 km alrededor de la fuente de emisión [23].

Para este estudio se evalúan mayormente efectos a escala local y las distancias siempre son mucho menores que 100 km por lo que se ha adoptado un modelo de pluma Gaussiana implementado en el software ISC-AERMOD View que se presenta en la figura 11, este fue diseñado para apoyar las opciones de modelación de

emisiones reguladas y se usa actualmente por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA).

En el software ISC-AERMOD View se usan seis rutas de entrada de datos que componen las bases de la organización funcional de un archivo continuo que se ejecuta una vez que se completa la información requerida [23].

Estas rutas son:

1. Ruta de control: donde se especifica el escenario de modelación y el control general de la ejecución del modelo.
2. Ruta de fuente: donde se definen las fuentes de emisiones contaminantes y sus características.
3. Ruta de receptores: donde se definen los receptores para determinar el impacto sobre la calidad del aire en lugares específicos.
4. Ruta meteorológica: donde se definen las condiciones atmosféricas de la zona que se está modelando, de esta manera se pueden tomar en cuenta al determinar la distribución de los impactos de los contaminantes atmosféricos en la zona.
5. Ruta de la malla de terreno (TG): donde se puede especificar una malla de datos de terreno para ser utilizados en el cálculo y así poder considerar un terreno con elevaciones o complejo.
6. Ruta de salida: donde se definen los resultados de salida que son necesarios para satisfacer las necesidades para analizar los escenarios modelados.

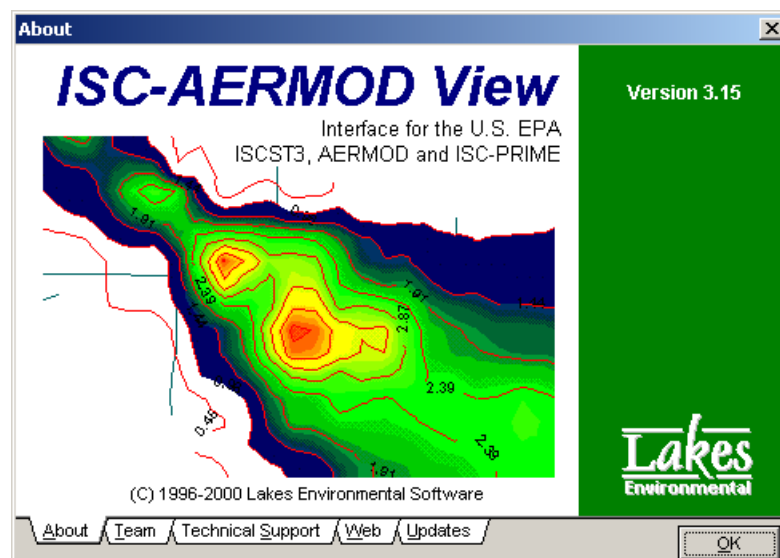


Figura 15. Presentación del software ISC-AERMOD View.

Algunas de las posibilidades del software son:

- Puede manejar fuentes múltiples, incluyendo puntuales, volumétricas, de área, y los tipos de fuente de hoyos abiertos. También se pueden tratar fuentes de línea como un cordón de fuentes de volumen o como fuentes de área alargadas.

- Las fuentes de emisión se pueden tratar como constantes o se pueden variar por mes, estaciones, horas del día, u otros periodos seleccionados. Empleando factores de emisión variables que se pueden especificar para una sola fuente o para un grupo de fuentes.
- El modelo puede considerar los efectos aerodinámicos debido a los edificios cercanos a las fuentes de emisiones. Contiene algoritmos para modelar los efectos de precipitación de gases o partículas.
- Se pueden especificar arreglos de receptores como maya y/o receptores discretos en un sistema de coordenadas cartesianas o polares.
- Incorpora el modelo de algoritmos de dispersión COMPLEX1 para los receptores en terreno complejo.
- Utiliza el modelo de datos meteorológicos en tiempo real para considerar las condiciones atmosféricas que afectan la distribución de la contaminación atmosférica en el área modelada.

2.10.2. Parámetros de emisión de las fuentes.

En la tabla 16 se presentan los parámetros de las fuentes de emisión de gases contaminantes que se analizan en este estudio.

Para considerar, en la modelación de la dispersión de contaminantes, las variaciones de las tasas de emisión en las fuentes se construyó un fichero de emisión horaria para cada contaminante; en este caso NO_x, SO₂ y PM₁₀. Este fichero incluye para cada fuente la variación horaria de la tasa de emisión, la temperatura y la velocidad de salida de los gases, a modo de ejemplo se muestra en el Anexo 1 una parte del fichero de emisión horaria para el NO₂. Para construir estos ficheros se tomaron los datos del libro de incidencias que se lleva como control en la central, en este se refleja para cada motor de la central el régimen de operación horaria los 365 días del año, lo que permite definir para cada hora los motores en operación y entonces determinar la tasa de emisión de cada chimenea.

2.10.3. Impacto asociado al dióxido de azufre.

El dióxido de azufre es uno de los contaminantes de mayor incidencia en las afectaciones a la calidad del aire de los ciclos de combustión, su origen está dado por la oxidación del azufre contenido en el combustible. Para este caso de estudio se ha modelado la dispersión de las emisiones de este contaminante y se calculan los incrementos de concentraciones promedio para períodos de 24 h y un año, los máximos valores de concentración promedio se muestran en las tablas 19 y 20 respectivamente.

En la tabla 19 se muestran los valores más significativos (máximos) de concentración incremental de dióxido de azufre calculados para períodos de 24 h, se presentan además en esta tabla la fecha de ocurrencia y la localización en el sistema de coordenadas UTM, en el Anexo 2 se puede apreciar el mapa de

concentraciones para el área de estudio del primer máximo. Es importante mencionar que el primer máximo de concentración es la condición más crítica de contaminación que se presenta en cada receptor (se denomina receptor a cada punto de la malla para la modelación donde se calculó el incremento de concentración). En la figura 16 se establece una comparación entre los valores medidos y el valor de la norma donde se aprecia que todos los valores medidos están por debajo de lo establecido para concentraciones incrementales de un día.

Tabla 19. Concentración incremental máxima de SO₂ promedio de 24 h, índice y categoría de calidad de aire.

Máximo	Concentración 24 h, (mg/m ³)	Índice de calidad del aire	Categoría de calidad del aire	Fecha (A/M/D)	Localización (UTM)	
					x	y
CMA	50*	100	Aceptable	—	—	—
1	24.8	50	Buena	13/05/01	699000	314800
2	22.7	45	Buena	13/05/03	692000	314800
5	12.6	25	Buena	13/06/25	692000	314800
6	12.0	24	Buena	13/12/11	692000	314800

Nota: CMA: Concentración máxima admisible del contaminante en el aire como promedio de 24 h.

* Concentración máxima admisible como promedio de 24 h establecida por la NC 39:1999.

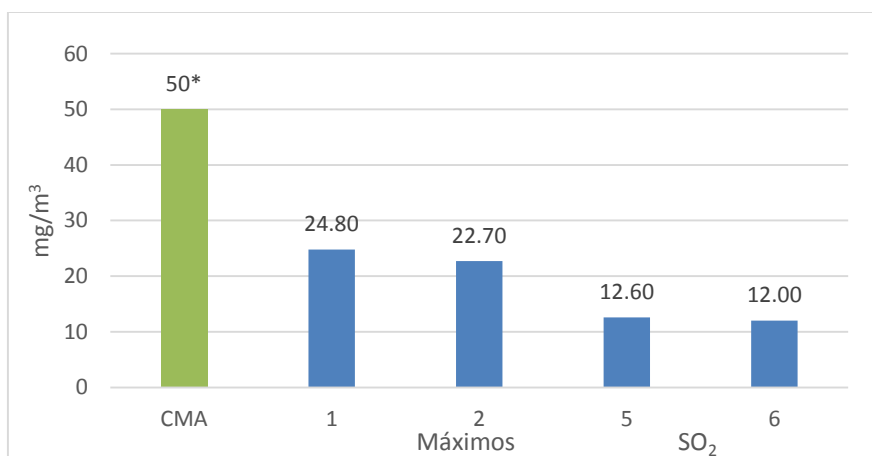


Figura 16. Concentración incremental promedio de 24 h

En la tabla 20 se muestra la magnitud de los diez máximos de concentraciones incrementales promedio de SO₂ para el año y la localización del receptor donde fue calculada, puede concluirse que en todos los casos los valores de la concentración incremental calculada están por debajo del límite que establece la norma, esto se ilustra en la figura 17.

Tabla 20. Concentraciones máximas incrementales de SO₂ promedio de un año.

Máximo	Concentración promedio para un año, (µg/m ³)	Localización (UTM)	
		x	y
CMA	80*	—	—
1	2.1	699200	314800
2	1.6	699000	314800
3	1.5	699200	314600
4	1.2	698800	314600
5	1.1	699000	314600
6	1.1	698800	314800
7	0.9	698600	314600
8	0.9	699000	314400
9	0.9	699200	314400
10	0.8	699400	314600

*Concentración máxima admisible en el aire promedio para un año según National Ambient Air Quality Standard (NAAQS), EPA, USA [24].

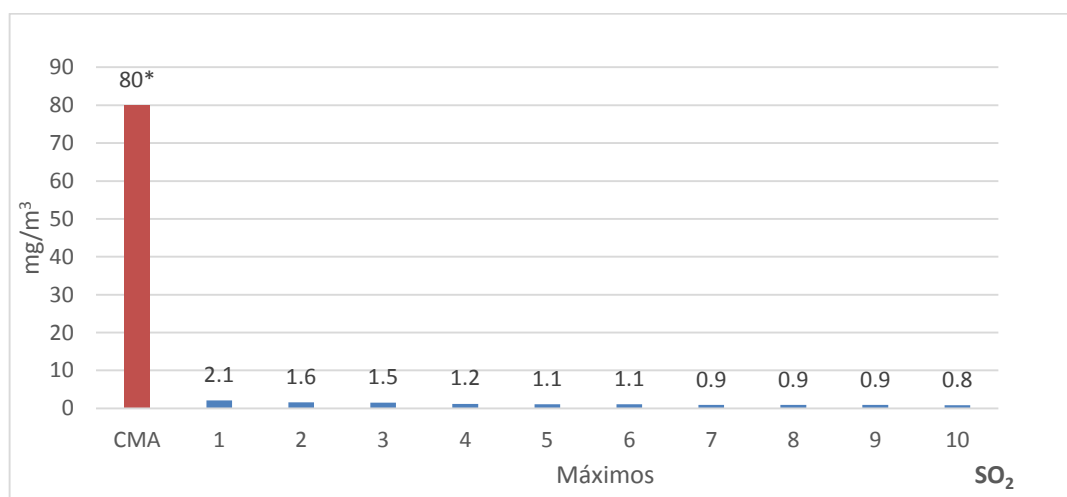


Figura 17. Concentración incremental promedio para un año.

Del análisis anterior puede concluirse que las emisiones de SO₂ no son de alta preocupación pues los máximos tanto para un año como para 24h no exceden lo establecido por la norma.

2.10.4. Impacto asociado al dióxido de nitrógeno.

El NO₂ es uno de los contaminantes atmosféricos de mayor preocupación con relación a la salud humana. Este se genera principalmente cuando en el proceso de combustión el nitrógeno del combustible es convertido a óxido de nitrógeno y además cuando el nitrógeno y el oxígeno atmosférico se combinan por las altas temperaturas de la combustión. Por esta razón la generación de electricidad es una de las mayores fuentes de emisión de óxidos de nitrógeno.

Para este contaminante al igual que para el caso anterior se ha modelado la dispersión de las emisiones desde la central y se calcularon los incrementos de concentraciones promedio para períodos de 24 h y un año en el área de estudio. Los valores máximos de la concentración incremental promedio se muestran en las tablas 21 y 22.

En la tabla 21 se muestran los seis máximos de concentración incremental promedio de 24 h de dióxido de nitrógeno y se reporta además la fecha de ocurrencia y la localización, en el Anexo 3 puede verse el mapa de concentraciones para el área de estudio del primer máximo.

Tabla 21. Concentración incremental máxima de NO₂ promedio de 24 h, índice y categoría de calidad de aire.

Máximo	Concentración 24 h, (mg/m ³)	Índice de calidad del aire	Categoría de calidad del aire	Fecha (A/M/D)	Localización (UTM)	
					x	y
CMA	40*	100	Aceptable	—	—	—
1	81.4	203	Mala	13/05/01	699000	314800
2	74.5	186	Deficiente	13/05/03	699200	314800
3	53.6	134	Deficiente	13/05/11	699000	314800
4	45.3	113	Deficiente	13/04/24	699000	314800
5	41.4	103	Deficiente	13/06/25	699200	314800

Nota: CMA: Concentración máxima admisible del contaminante en el aire promedio de 24 h.

* Concentración máxima admisible como promedio de 24 h establecida por la NC 39:1999.

Al analizar de manera comparativa los cinco primeros máximos promedio para 24 h de NO₂ puede concluirse que todos exceden lo establecido por la norma como límite como se ilustra en la figura 16, correspondiéndole al primer máximo la categoría de calidad del aire de mala y a los siguientes la categoría de deficiente, lo cual constituye puntos de atención por la posibilidad de eventos críticos de contaminación. Para valorar con precisión la magnitud del impacto asociado es clave estimar los niveles de personas expuesta a estas categorías de calidad del aire.

En la tabla 22 se presenta la magnitud de los diez máximos de concentraciones incrementales promedio de NO₂ para un año y la localización del receptor donde fue calculada, en el Anexo 4 puede verse el mapa de concentraciones para el área de estudio.

Al comparar la magnitud de los máximos de la CIC reportados en la tabla 22 con la CMA que refiere la norma citada para este contaminante puede concluirse que en todos los casos los valores de la CIC están por debajo del límite que establece la norma, lo que se puede constatar en la figura 17.

Tabla 22. Concentraciones máximas incrementales de NO₂ promedio de un año.

Máximo	Concentración promedio para un año, (µg/m ³)	Localización (UTM)	
		x	y
CMA	40*	699200	314800
1	7.0	699000	314800
2	5.4	699200	314600
3	4.9	698800	314600
4	4.2	699000	314600
5	3.8	698800	314800
6	3.7	698800	314800
7	3.1	698600	314600
8	3.1	699000	314640
9	3.0	699200	314400
10	2.9	699400	314600

* Concentración máxima admisible en el aire como promedio para un año según European Commission Environment. Air Quality Standards 2010 [25].

Las emisiones de NO₂ son de mayor preocupación por los eventos agudos de contaminación que pueden provocar en algunos puntos del área de estudio y no por la exposición que generan como promedio durante períodos largos, lo cual se deduce cuando se verifica que en algunas zonas del área de estudio la concentración promedio diaria calculada excede la máxima admisible según la NC 39:1999, mientras que en ningún momento la concentración promedio anual supera el límite normado por la European Commission Environment Air Quality Standards 2010.

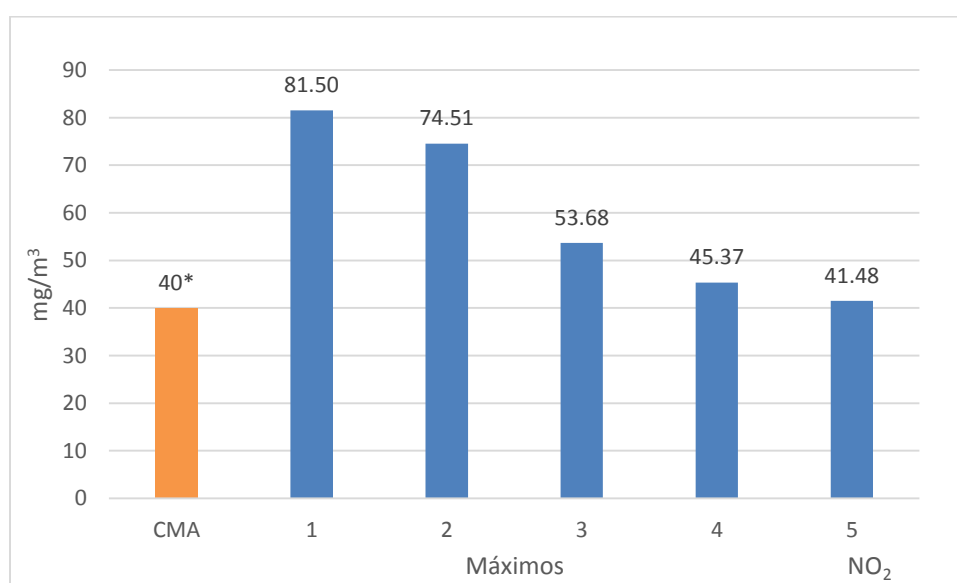


Figura 18. Máximos de NO₂ para 24 horas.

Como se puede apreciar los 5 máximos sobrepasan los límites permisibles para 24h.

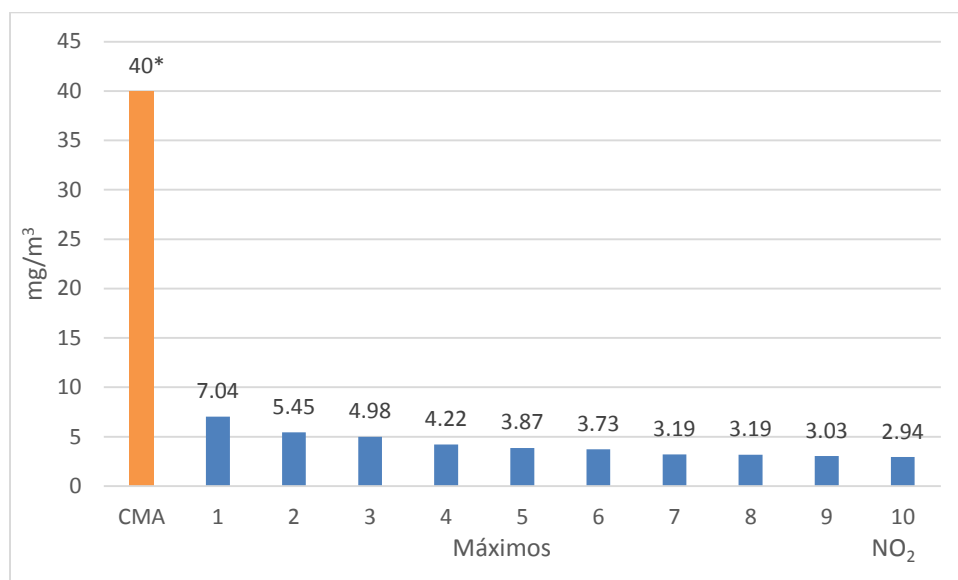


Figura 19. Máximos para un año.

2.10.4. Impacto asociado al PM₁₀.

En la literatura la combustión en motores de combustión interna se reporta como una de las fuentes principales de emisión de partículas, por lo que las centrales constituyen un importante emisor. Al igual que en los casos analizados anteriormente se analizan las emisiones de contaminantes para 24h y para un año en la tabla 23 y 24 respectivamente.

Tabla 23. Concentración incremental máxima de PM₁₀ promedio de 24 h, índice y categoría de calidad de aire.

Máximo	Concentración 24 h, (mg/m³)	Índice de calidad del aire	Categoría de calidad del aire	Fecha (A/M/D)	Localización (UTM)	
					x	y
CMA	50*	100	Aceptable	—	—	—
1	11.7	69	Buena	13/05/01	699000	314800
2	10.7	63	Buena	13/05/03	699200	314800
5	5.9	54	Buena	13/06/25	699200	314800

Nota: CMA: Concentración máxima admisible del contaminante en el aire promedio de 24 h.

* Concentración máxima admisible como promedio de 24 h establecida por la NC 39:1999.

Aparecen en la tabla 23 los tres máximos de concentración incremental promedio de 24 h de PM₁₀ y se reporta además la fecha de ocurrencia y la localización, en el Anexo 5 se muestra el mapa de concentraciones para el área de estudio del primer máximo.

Al analizar de manera comparativa el valor de la CMA con el valor de los tres primeros máximos de CIC promedio para 24 h de PM₁₀ se puede concluir que en ningún caso exceden lo que establece la norma como límite, esto se ilustra en la figura 21, correspondiéndole a todos los máximos la categoría de calidad del aire de buena.

Se presenta en la tabla 24 la magnitud de los diez máximos de concentraciones incrementales promedio de PM₁₀ para un año y la localización del receptor donde fue calculada, en el Anexo 6 se muestra el mapa de concentraciones para este contaminante en el área de estudio. En todos los casos los valores de la CIC están por debajo del límite que establece la norma, lo que se puede constatar en la figura 20.

Tabla 24. Concentraciones máximas incrementales de PM₁₀ promedio de un año.

Máximo	Concentración promedio para un año, ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Localización (UTM)	
		x	y
CMA	40**	—	—
1	1.01426	699200	314800
2	0.78462	699000	314800
3	0.71709	699200	314600
4	0.60847	698800	314600
5	0.55686	699000	314600
6	0.53741	698800	314800
7	0.45968	698600	314600
8	0.45896	699000	314400
9	0.43715	699200	314400
10	0.42406	699400	314600

** Concentración máxima admisible en el aire como promedio para un año según European Commission Environment. Air Quality Standards 2010 [25].

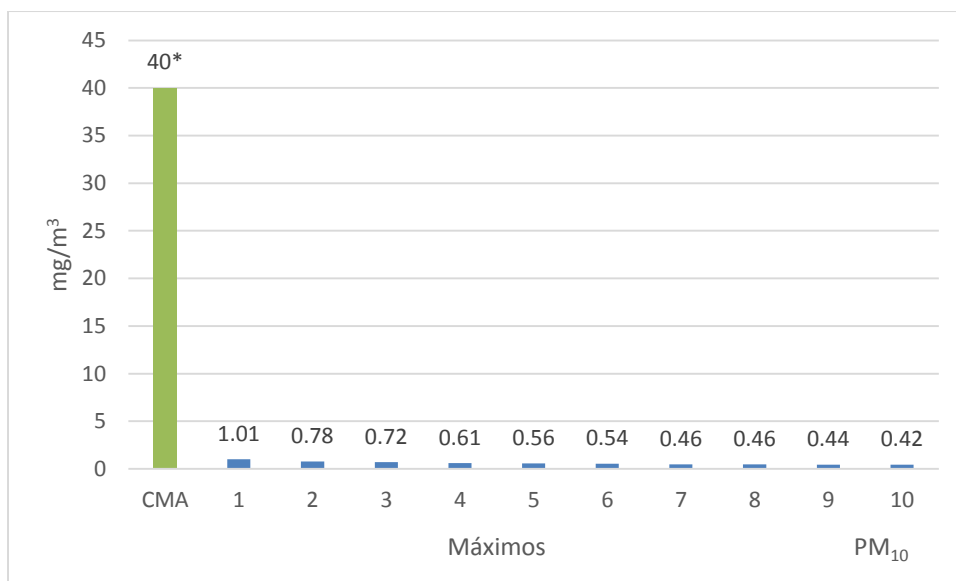


Figura 20. Concentración incremental máxima de PM₁₀ promedio para un año.

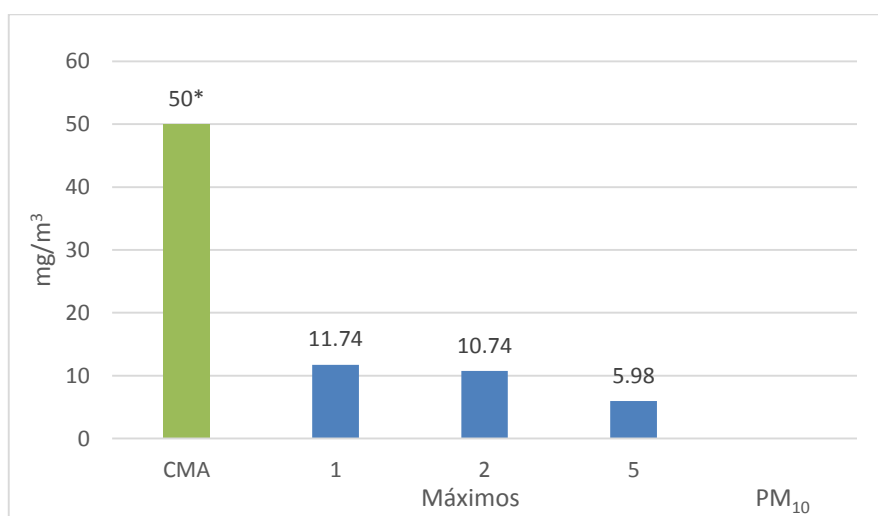


Figura 21. Concentración incremental máxima de PM₁₀ promedio de 24 h

Capítulo 3: Análisis de los resultados.

3.1. Introducción

El logro de opciones de tecnología energética menos contaminantes, asegurando servicios fiables, asequibles, económicamente viables, socialmente aceptables y ecológicamente racionales de la energía es esencial para el desarrollo sostenible.

En los últimos dos siglos, la población y el consumo de recursos, incluida la energía, han experimentado una gran expansión, que a su vez ha dado lugar a un rápido aumento en la magnitud del impacto antropogénico sobre el medio ambiente. Uno de los impactos antropogénicos más visibles son las relacionadas con el uso de la energía, que se ha demostrado que causa daño a una amplia gama de receptores, incluida la salud humana, los ecosistemas naturales y el entorno construido. Las alternativas de suministro de energía y su régimen de explotación desempeñan un papel decisivo en el impacto ambiental local. Los combustibles fósiles y ciclos de combustión se encuentran entre las principales causas de daños al medio ambiente, como resultado de las especies contaminantes emitidas por la combustión y el uso generalizado de esta fuente de energía. Relacionados con la energía el principal problema ambiental identificado a escala global es el calentamiento global, y en la escala local, los efectos en la salud humana de los gases contaminantes.

3.2. Variabilidad de la demanda.

Los impactos ambientales de una planta de generación eléctrica, entre otros factores, como el clima y la topografía, dependen en gran medida de la demanda de energía a cubrir. Dependiendo de la eficiencia de la planta, la demanda guarda una relación directa con el consumo de combustible, que a su vez define, junto con las condiciones de la combustión, la magnitud de las emisiones de gases contaminantes. En la figura 22 se muestra en orden ascendente la variación horaria de la demanda para el año que se analiza, se puede apreciar varios valores de interés, la máxima demanda a la que se enfrentó la planta, 13.44 MW, la demanda horaria promedio 7.3 MW, y la capacidad instalada para cada una de las tecnologías con las que cuenta la planta MTU – 15.1 MW, MAN – 7.7 MW y Hyundai – 6.8. La capacidad instalada para la generación con MTU representa el 51% de la capacidad instalada en la planta, la capacidad instalada en tecnología MAN representa el 26% y los motores Hyundai representan un 22%. Los motores MTU (diésel) a pesar de representar más del 50% de la capacidad instalada son los motores que menos horas de trabajo, esto se debe a que el combustible diésel tiene un valor monetario más alto que el fueloil. Sin embargo el combustible fueloil es más contaminante que el diésel, su contenido de azufre es más elevado, lo conduce a emisiones de SO₂, por otro lado su combustión es más difícil, al presentar una mayor viscosidad y menor punto de inflamación, tendiendo a emitir más carbono sin quemar y monóxido de carbono.

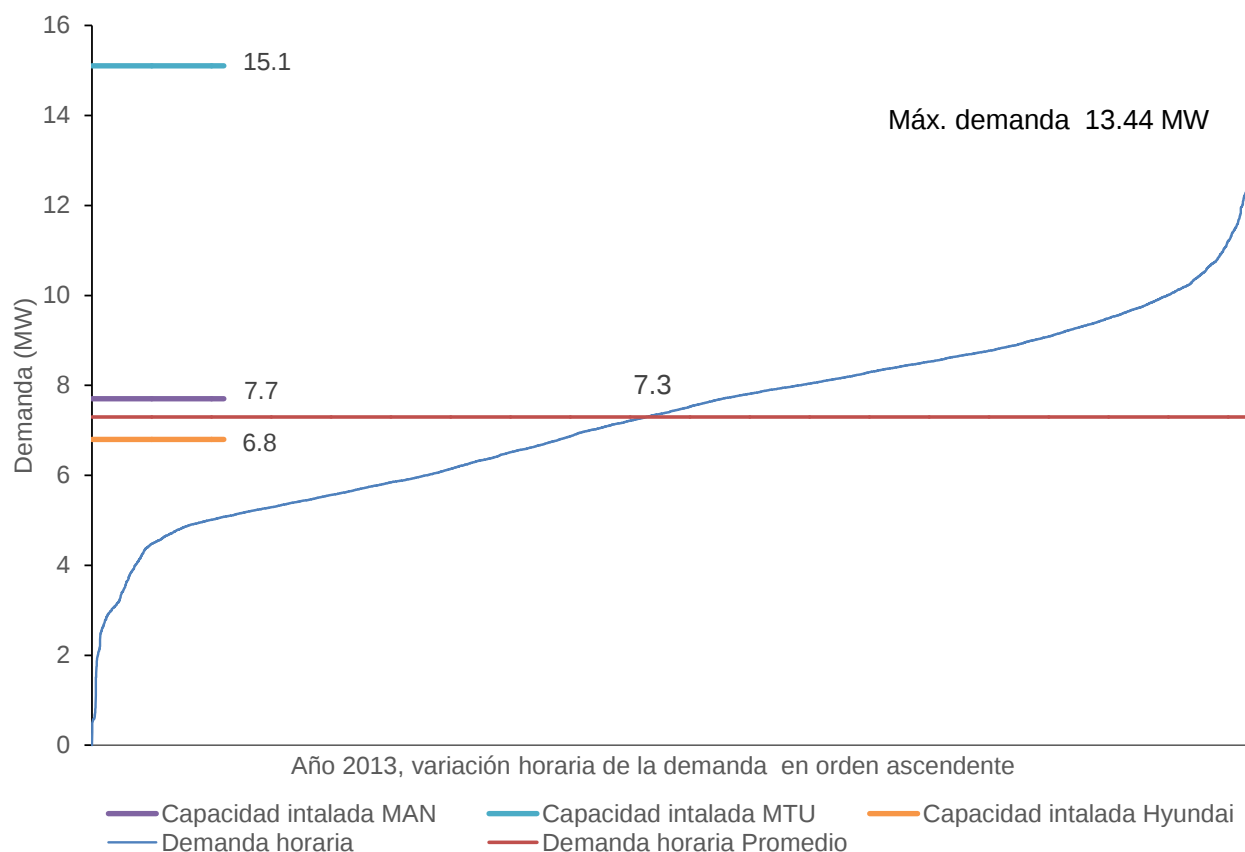


Figura 22. Variación horaria de la demanda en orden ascendente.

3.3. Análisis del régimen de carga.

Para analizar el régimen de carga de los motores se realizaron histogramas de frecuencia, a partir de una recopilación de datos sobre el control de la demanda horaria, desde la hora uno del mes de enero hasta la hora 24 del mes de diciembre, con lo que se realizó un gráfico que resume las variaciones de carga para estos motores. Como se puede observar en la figura 8 del epígrafe 2.6 (resumen del régimen de carga del 2013) el rango de trabajo más frecuente está entre el 70% y 80%. Sin este análisis previo, no se sabría con exactitud en qué % de carga se debían realizar las mediciones de gases contaminantes.

3.4. Demanda promedio por tecnología para el año 2013.

En la figura 23 se muestra la energía generada por cada una de las tecnologías con las que cuenta la planta, el valor representativo de energía generada por la planta para el 100% en el 2013 es de 63,912 MWh, de este 100% le corresponde solo el 29% a los motores MTU, 25% a los motores Hyundai y el 46% a los motores MAN.

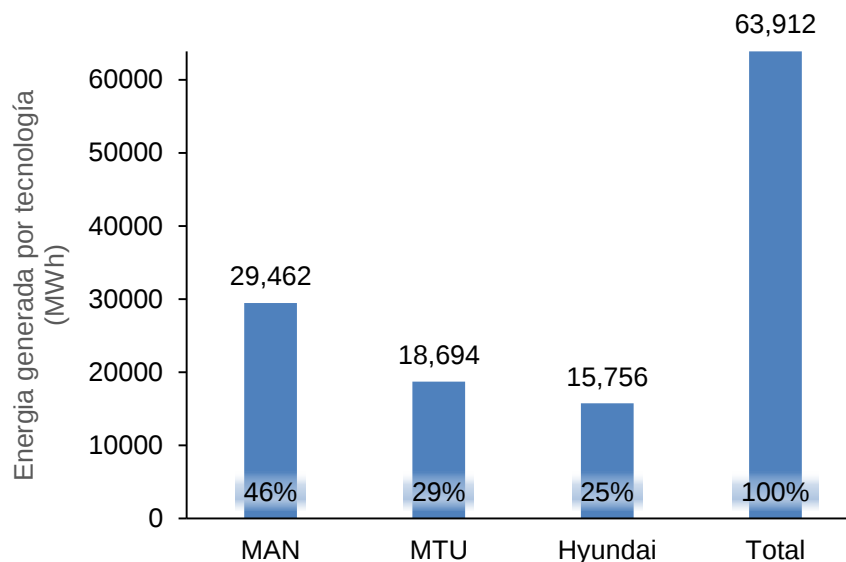


Figura 23. Energía generada por tecnología en el año 2013

En las figuras 24, 25, 26 y 27 se expresa la variación horaria de la demanda por trimestres para la planta, con estos valores representados para cada hora se obtiene un grado de precisión mayor. Estos gráficos guardan un estrecho vínculo con las emisiones a la atmosfera ya que se tienen las diferentes emisiones para cada hora, relacionándolo con la velocidad del viento nos permite realizar un análisis específico de un día determinado. En el epígrafe 3.4.1 se ejemplifica lo descrito anteriormente para el día de mayores emisiones determinadas mediante la modelación de la dispersión de los contaminantes. También se puede apreciar que los motores MTU y MAN fueron las tecnologías responsables de cubrir la demanda durante el primer y segundo trimestre del año, en el tercer y cuarto trimestre se aprecia una disminución en la demanda cubierta por la tecnología MAN y MTU, desplazándose la carga a la tecnología Hyundai. En estos gráficos se aprecian claramente los picos de demanda que cubrió cada una de las tecnologías.

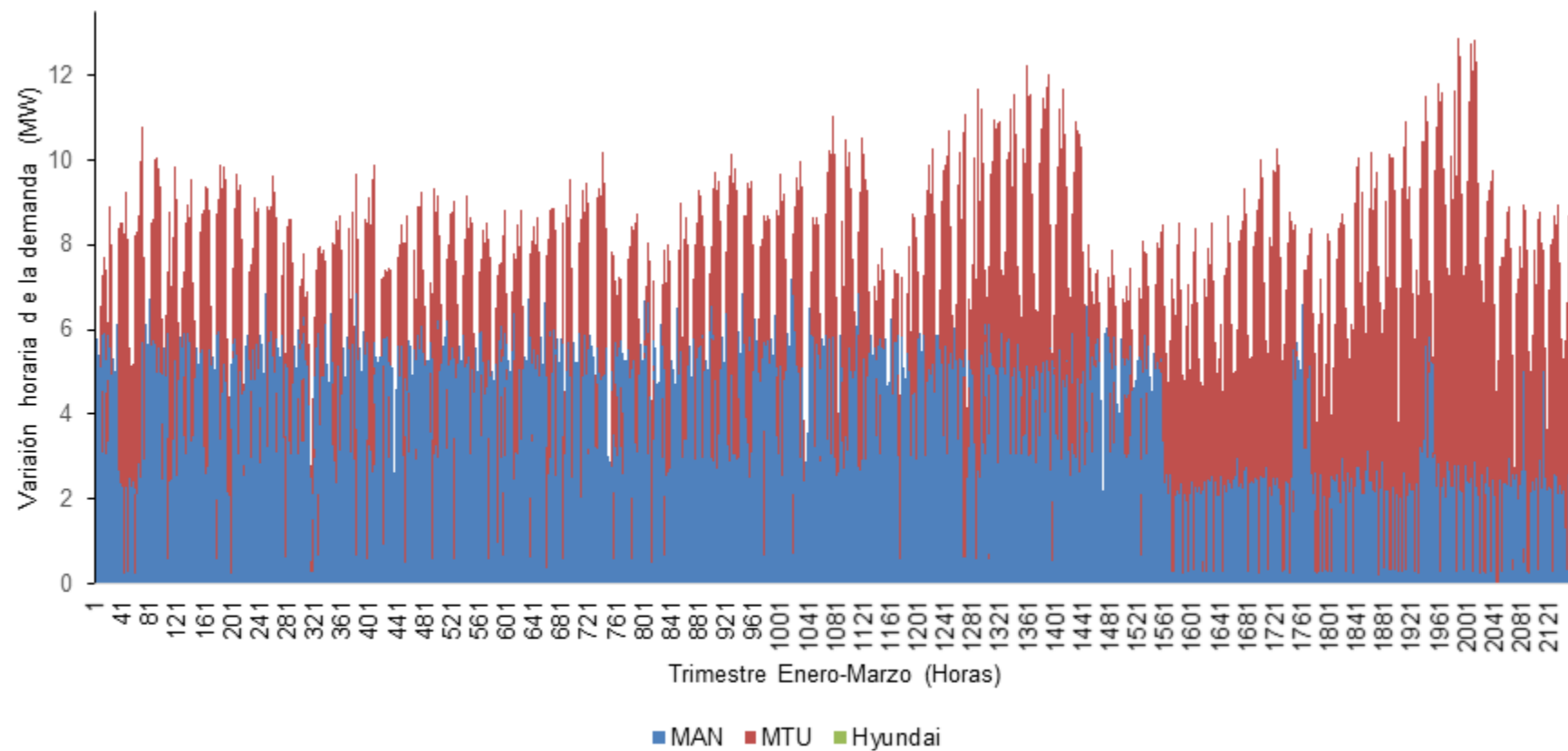


Figura 24. Variación horaria de la demanda en el periodo Enero-Marzo 2013.

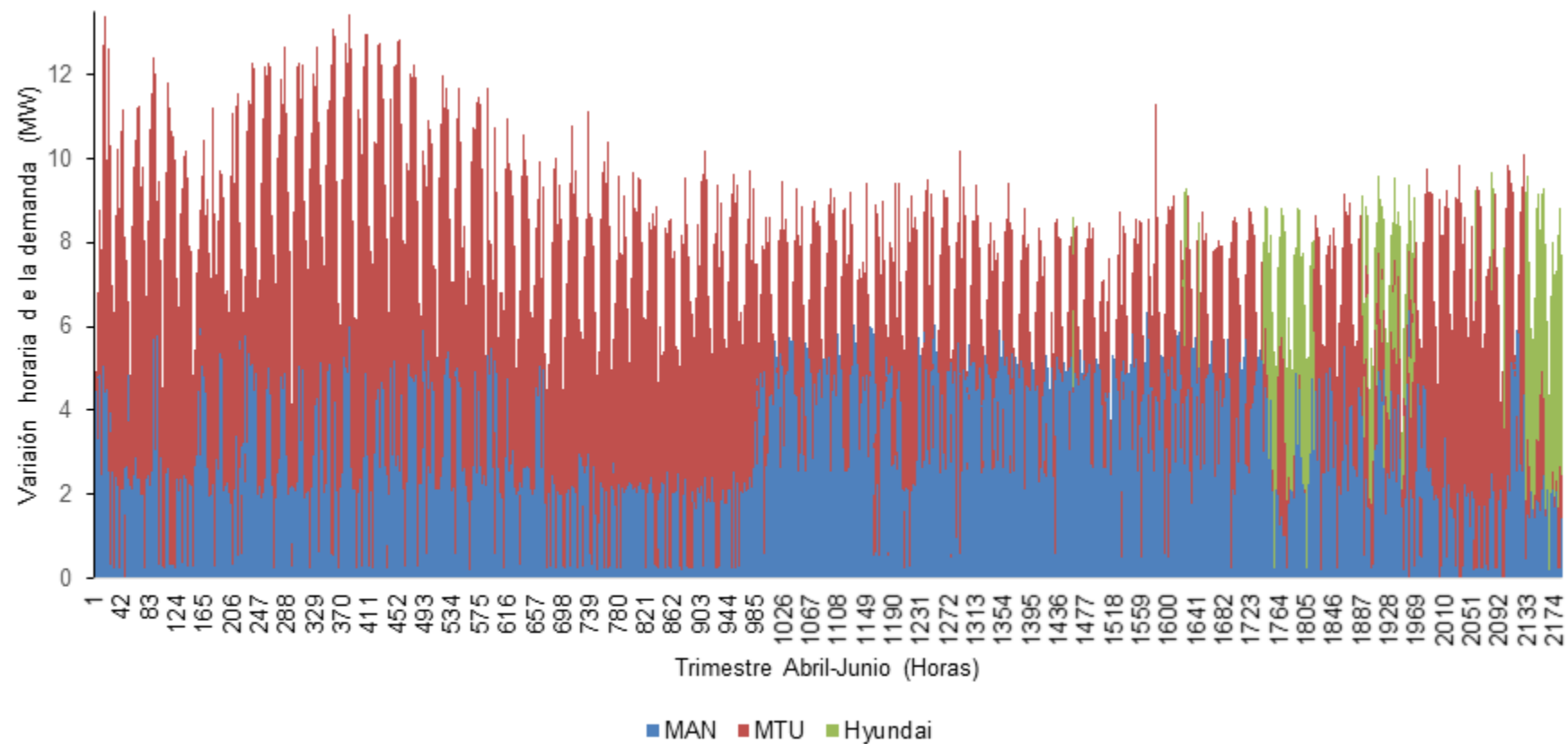


Figura 25. Variación horaria de la demanda en el periodo Abril-Junio 2013.

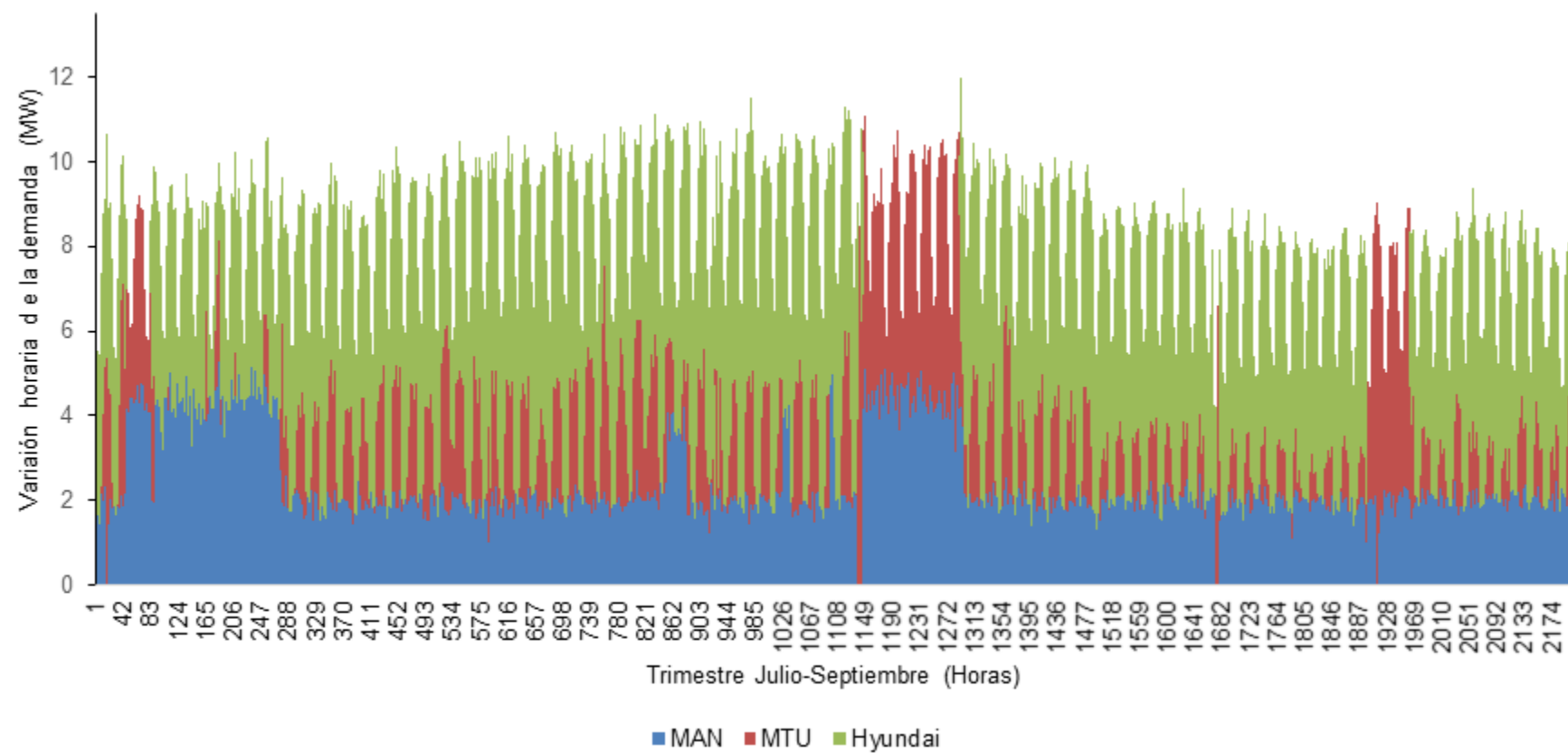


Figura 26. Variación horaria de la demanda en el periodo Julio-Septiembre 2013.

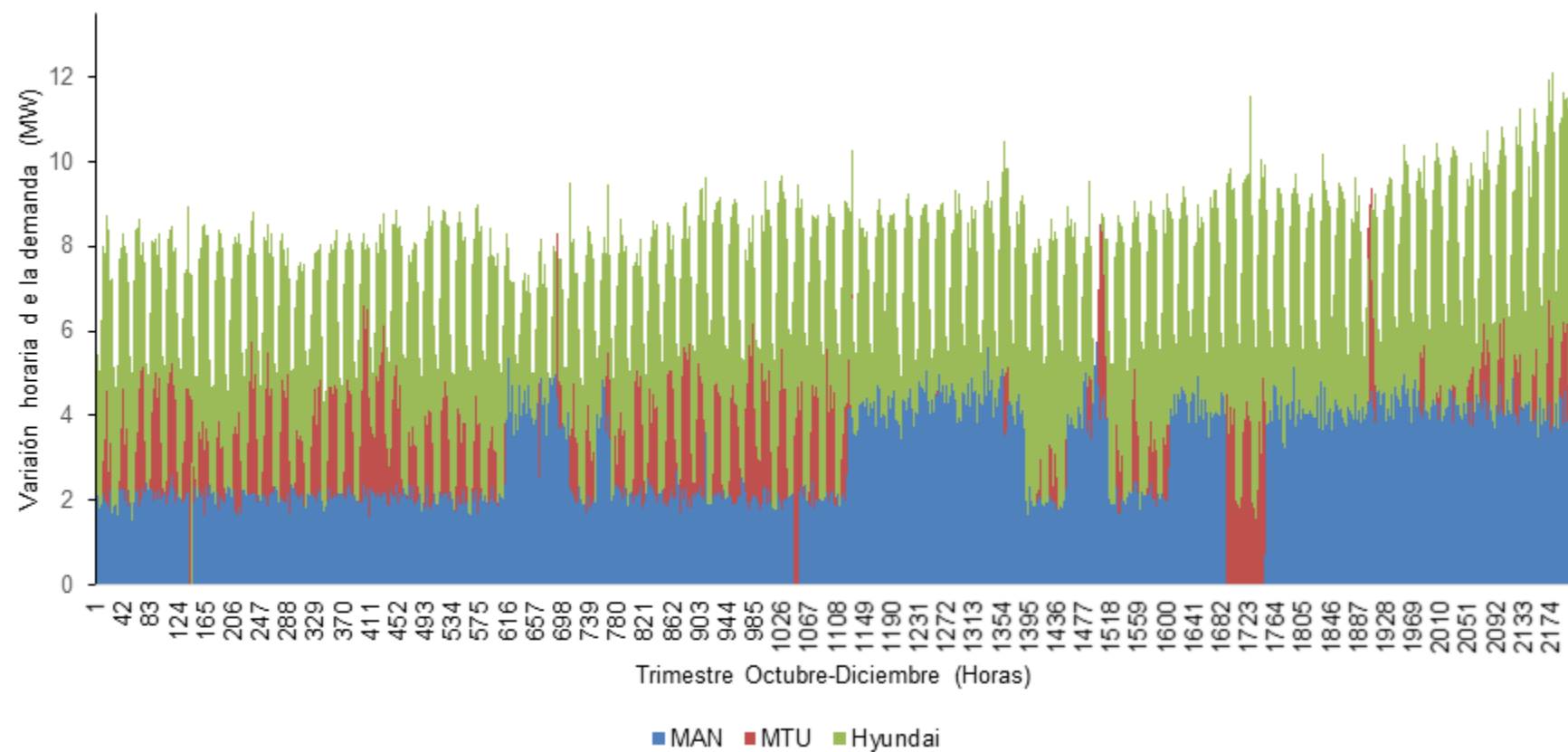


Figura 27. Variación horaria de la demanda en el periodo Octubre-Diciembre 2013.

3.4.1. Análisis del día de mayor emisión.

Al analizar de manera comparativa los cinco primeros máximos promedio para 24 h de NO₂, puede concluirse que todos exceden lo establecido por la norma como límite, lo que se ilustra en la figura 28, correspondiéndole a el primer máximos la categoría de calidad del aire de mala y los demás la de deficiente, lo cual constituye un puntos de atención por la posibilidad de eventos críticos de contaminación. Sin embargo se puede apreciar en los anexos 3 y 4, donde se muestran los mapas de dispersión del contaminante en el área de estudio que la dirección del viento conduce los contaminantes hacia una zona donde los niveles de actividad de personas son muy bajos. En la tabla 26 se muestra el análisis para el día del valor máximo de concentraciones dado por el software.

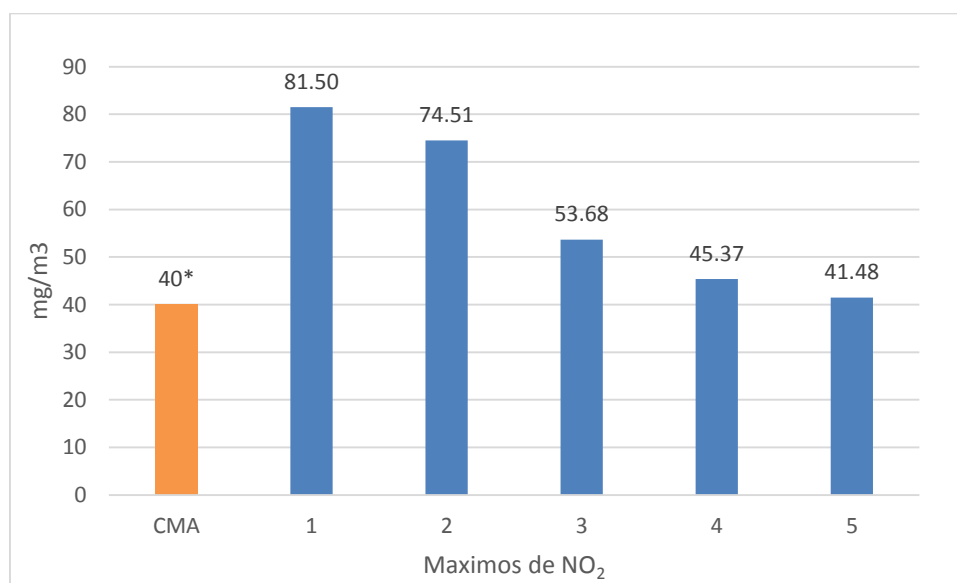


Figura 28. Valores Máximos de NO₂ para 24 horas

Tabla 26. Análisis para un día, 01/05/13.

Variable	Promedio diario del mes de mayo	Día 01/05/13
Consumo de combustible (ton)	19	37
velocidad del viento (m/s)	4.2	5.02

Puede observarse en la tabla 26 que el día en que ocurre la máxima concentración del contaminante existe un incremento del 50% del consumo de combustible con respecto al promedio mensual, lo que se asocia altos niveles de emisión.

En la figura 29 se representa el consumo de combustible del mes de mayo donde predomina por encima de los demás el día primero donde se consumieron 37 toneladas de combustible diésel.

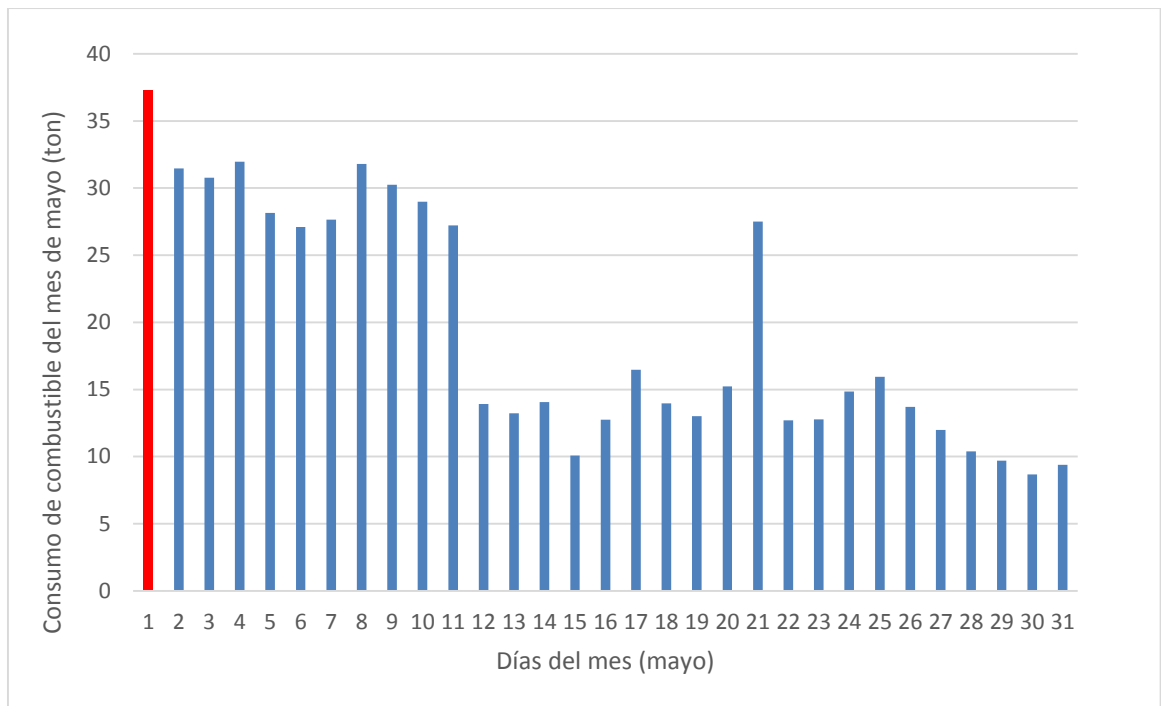


Figura 29. Consumo de combustible para el mes de Mayo.

Conclusiones.

- Para el SO₂ y el PM₁₀ los máximos niveles de emisión determinados se encuentran por debajo del límite máximo permisible que establece la norma tanto para emisiones de 24h como para un año.
- Las emisiones de NO₂ desde el punto de vista de las concentraciones que generan como promedio de un año no provoca un gran impacto pues en ningún momento la concentración promedio anual supera el límite normado, sin embargo se debe prestar atención a las concentraciones incrementales para períodos de 24 h y los eventos agudos de contaminación que pueden provocar en algunos puntos del área de estudio ya que se verificó que en algunas zonas la concentración promedio diaria calculada excede la máxima admisible según la NC 39:1999.
- La capacidad instalada en la planta es de 29.6 MW de ellos corresponde el 15.1 de esta capacidad instalada a los MTU de 15,1 MW lo que representa el 51% de la capacidad instalada en la planta, la generación MAN cuenta con una capacidad instalada de 7.7 MW lo que representa el 26% de la generación y los motores Hyundai cuentan con una capacidad instalada de 6,8 MW lo que representa un 22% de la generación de la planta.
- La planta es una alta consumidora de combustible, en el año 2013 se quemaron 4635 toneladas de combustible diésel, el día de mayor consumo fue el 25/03/13, 42.8 toneladas.
- Debido a la dirección del viento, los contaminantes emitidos a la atmosfera se depositan en un área donde no existe población alguna, solo mangle y aguas bajas, sin tener incidencias directas de impacto sobre las personas.

Recomendaciones

- Crear condiciones que permitan realizar análisis de gases en las unidades de generación MTU cumpliendo los requisitos establecidos por las norma a este efecto.
- Realizar una campaña de mediciones que permita incrementar la certidumbre de los factores de emisión para la tecnología MTU.
- Realizar un análisis de impacto considerando toda la planta, modelando la dispersión de los contaminantes de todas las fuentes de emisión.
- Incrementar el nivel técnico de los operarios.
- Investigar los puntos de máxima eficiencia de las tecnologías instaladas con el fin de implementar estrategias de operación que permitan operar el mayor tiempo posible en el entorno de dichos puntos.

Bibliografía

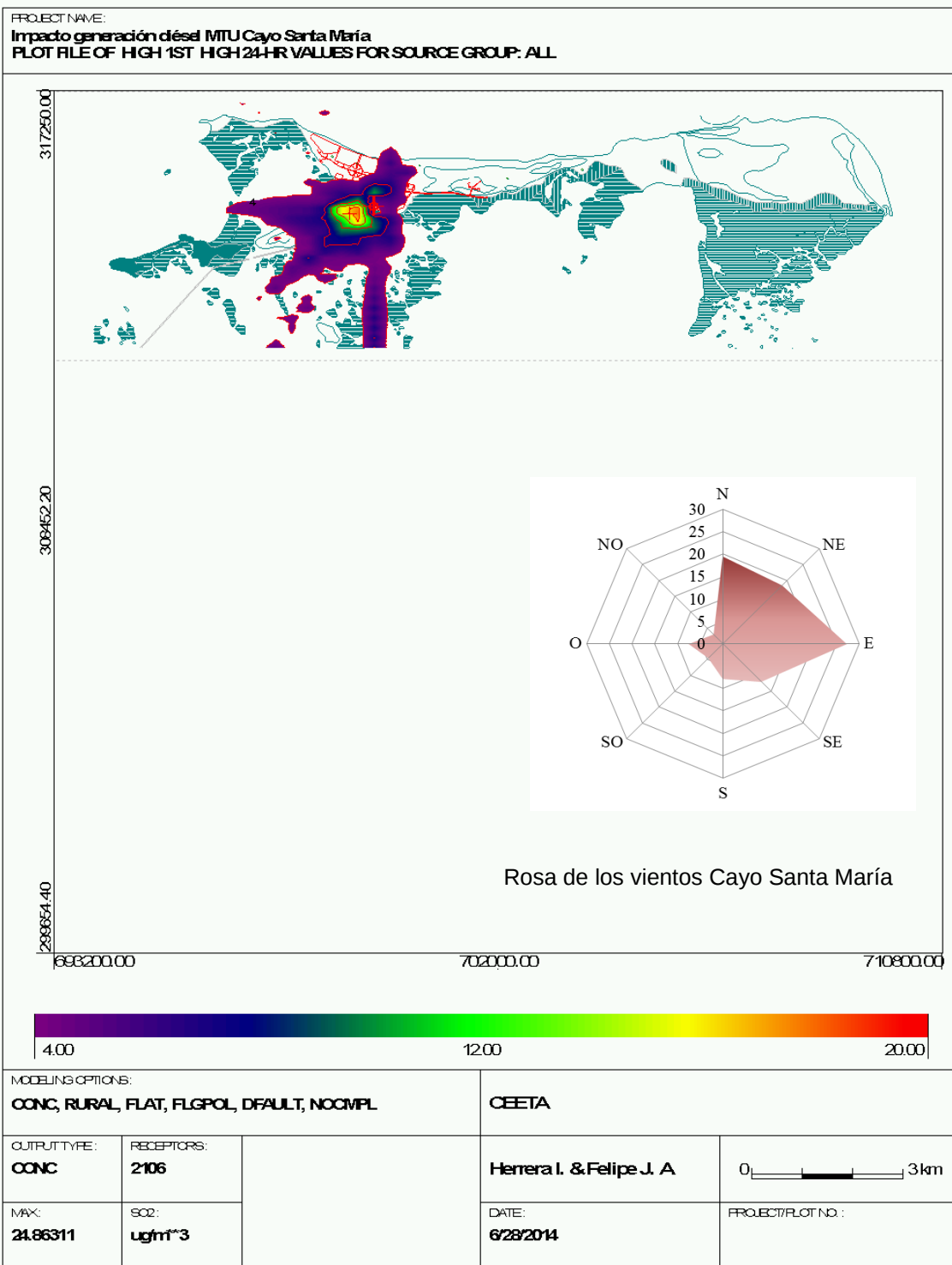
1. Kiely, G., *Ingeniería ambiental: fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión*. 1999: McGraw-Hill.
2. Salvato, J.A., N.L. Nemerow, and F.J. Agardy, *Environmental engineering*. 2003: John Wiley & Sons.
3. NC(55:2008), *Propuesta de Norma. Calidad del aire. Emisiones máximas admisibles de contaminantes a la atmósfera en fuentes fijas del sector de la energía*.
4. Dockery, D.W., et al., *An association between air pollution and mortality in six US cities*. New England journal of medicine, 1993. **329**(24): p. 1753-1759.
5. Herrera, I., et al., *Environmental impact of decentralized power generation in Santa Clara City, Cuba: An integrated assessment based on technological and human health risk indicators*. Applied Energy, 2013. **109**: p. 24-35.
6. Outlook, B.E., 2030. London, January, 2012.
7. Hester, R.E. and R.M. Harrison, *Sustainability and environmental impact of renewable energy sources*. Vol. 19. 2003: Royal Society of Chemistry.
8. Romero-Placeres, M., et al., *Contaminación atmosférica, asma bronquial e infecciones respiratorias agudas en menores de edad, de La Habana*. salud pública de méxico, 2004. **46**(3): p. 222-233.
9. ATMOSFÉRICA, E.S.C., *Métodos de series temporales en los estudios epidemiológicos sobre contaminación atmosférica*. Rev Esp Salud Pública, 1999. **73**(2).
10. Europe, W.H.O.R.O.f. and W.H. Organization, *Air quality guidelines: global update 2005: particulate matter, ozone, nitrogen dioxide, and sulfur dioxide*. 2006: World Health Organization.
11. N.C, *Calidad de el Aire: Requisitos Higienico Sanitarios*. 1999.
12. 242, N.C., *Guía de los datos tecnológicos para el inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos procedentes de fuentes puntuales industriales*. 2005.
13. 803, N.-T., *Normas de calidad del aire para las emisiones permisibles de contaminantes atmosféricos en fuentes fijas puntuales de las instalaciones de generación de electricidad y vapor*. 2010.
14. EPA, *Guia del usuario para el modelo de dispersión de contaminantes (ISC3)*. 1991.
15. OBE, *Planta Eléctrica Cayo Santa María*. . 2013.
16. Nacional, U.E., *Manual de Generación*. 2010.
17. Nacional, U.E., *Control de Operadores*. 2013.
18. Antonio, J., *Entrevista y recopilación de datos de la empresa*. 2014.
19. EPA. *Factor Information REtrieval (FIRE) Software*. Technology Transfer Network Clearinghouse for Inventories & Emissions Factors 2004; Available from: <http://www.epa.gov/ttn/chief/software/fire>.
20. ECOM America Ltd. *Flue Gas Analysing System*. 2008; Available from: <http://www.rbr.de>.
21. Cuban National Bureau of Standards, *Air quality - Admissible maximum emissions of pollutants atmosphere in punctual fixed sources of generating facilities of electricity and steam*. 2010.
22. Clara, M.C.o.V., *Hourly meteorological data file. Santa Clara, Cuba*. 2010.
23. EPA, *ISC-AERMOD view help. Lakes Environmental Software*. 2010.

24. EPA. *National Ambient Air Quality Standards (NAAQS)*. 2010 [cited 2011 24/03]; Available from: <http://www.epa.gov/air/criteria.html>.
25. European Commission Environment. *Air Quality Standards*. 2010 [cited 2011 25/03]; Available from: <http://ec.europa.eu/environment/air/quality/standards.htm>.

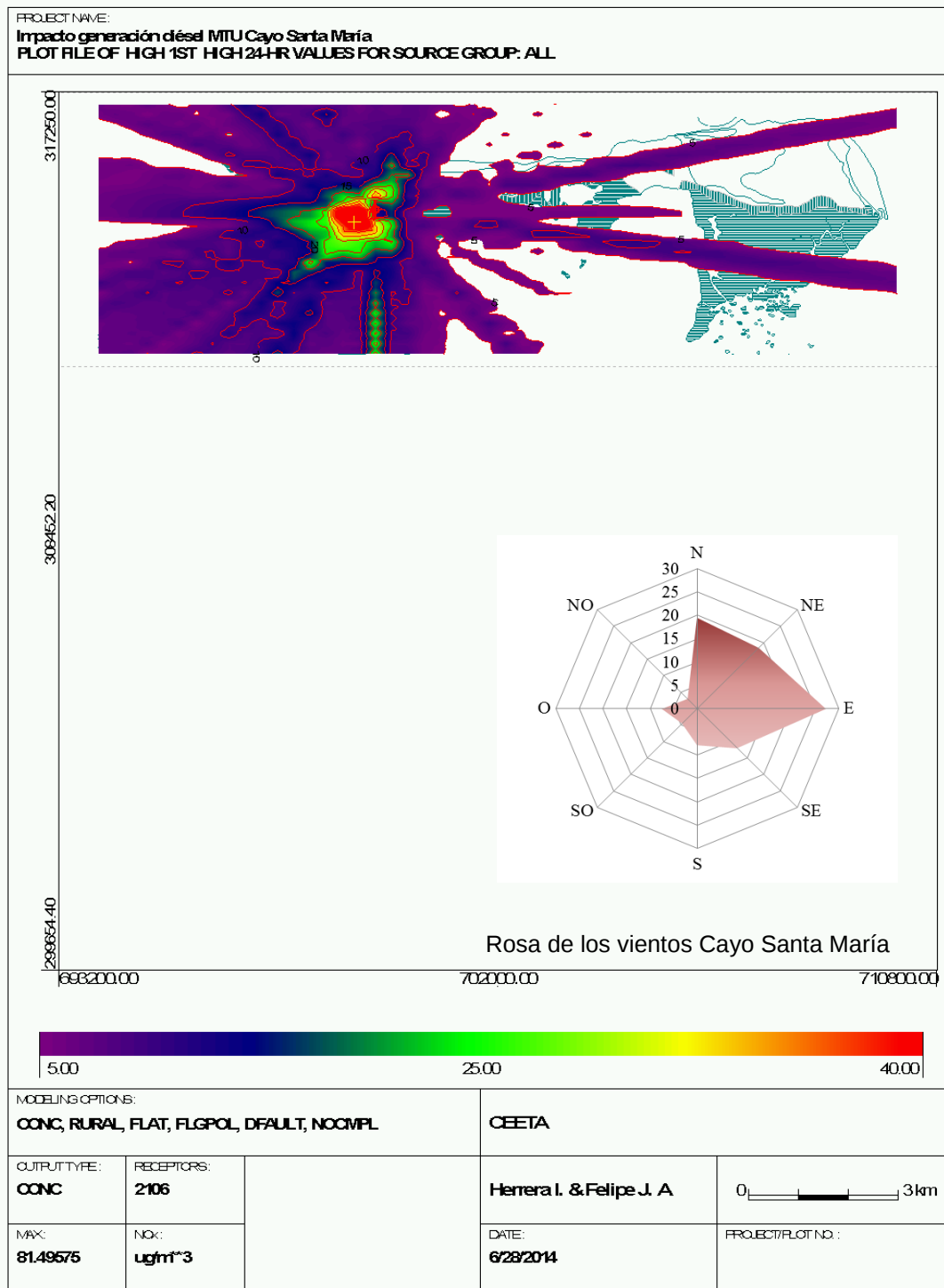
Anexo 1- Emisión variable, ejemplo de parte del fichero de emisión de NOx.

Año	Mes	Día	horas	Chimenea	tasa de la emisión (gs ⁻¹)	Temp de salida (K)	Velo de salida (ms ⁻¹)
13	1	2	11	stack2	0.0	0.0	0.0
13	1	2	11	stack3	0.0	0.0	0.0
13	1	2	11	stack4	1.2	745.0	32.0
13	1	2	11	stack5	1.2	745.0	32.0
13	1	2	11	stack6	1.2	745.0	32.0
13	1	2	11	stack7	0.0	0.0	0.0
13	1	2	11	stack8	0.0	0.0	0.0
13	1	2	12	stack1	1.2	745.0	32.0
13	1	2	12	stack2	0.0	0.0	0.0
13	1	2	12	stack3	0.0	0.0	0.0
13	1	2	12	stack4	1.2	745.0	32.0
13	1	2	12	stack5	1.2	745.0	32.0
13	1	2	12	stack6	1.2	745.0	32.0
13	1	2	12	stack7	0.0	0.0	0.0
13	1	2	12	stack8	0.0	0.0	0.0
13	1	2	13	stack1	1.2	745.0	32.0
13	1	2	13	stack2	0.0	0.0	0.0
13	1	2	13	stack3	0.0	0.0	0.0
13	1	2	13	stack4	1.2	745.0	32.0
13	1	2	13	stack5	1.2	745.0	32.0
13	1	2	13	stack6	1.2	745.0	32.0
13	1	2	13	stack7	0.0	0.0	0.0
13	1	2	13	stack8	0.0	0.0	0.0
13	1	2	14	stack1	1.2	745.0	32.0

Anexo 2- Concentración de SO₂ para 24h. cc



Anexo 3- Concentraciones de NOX para 24 h.

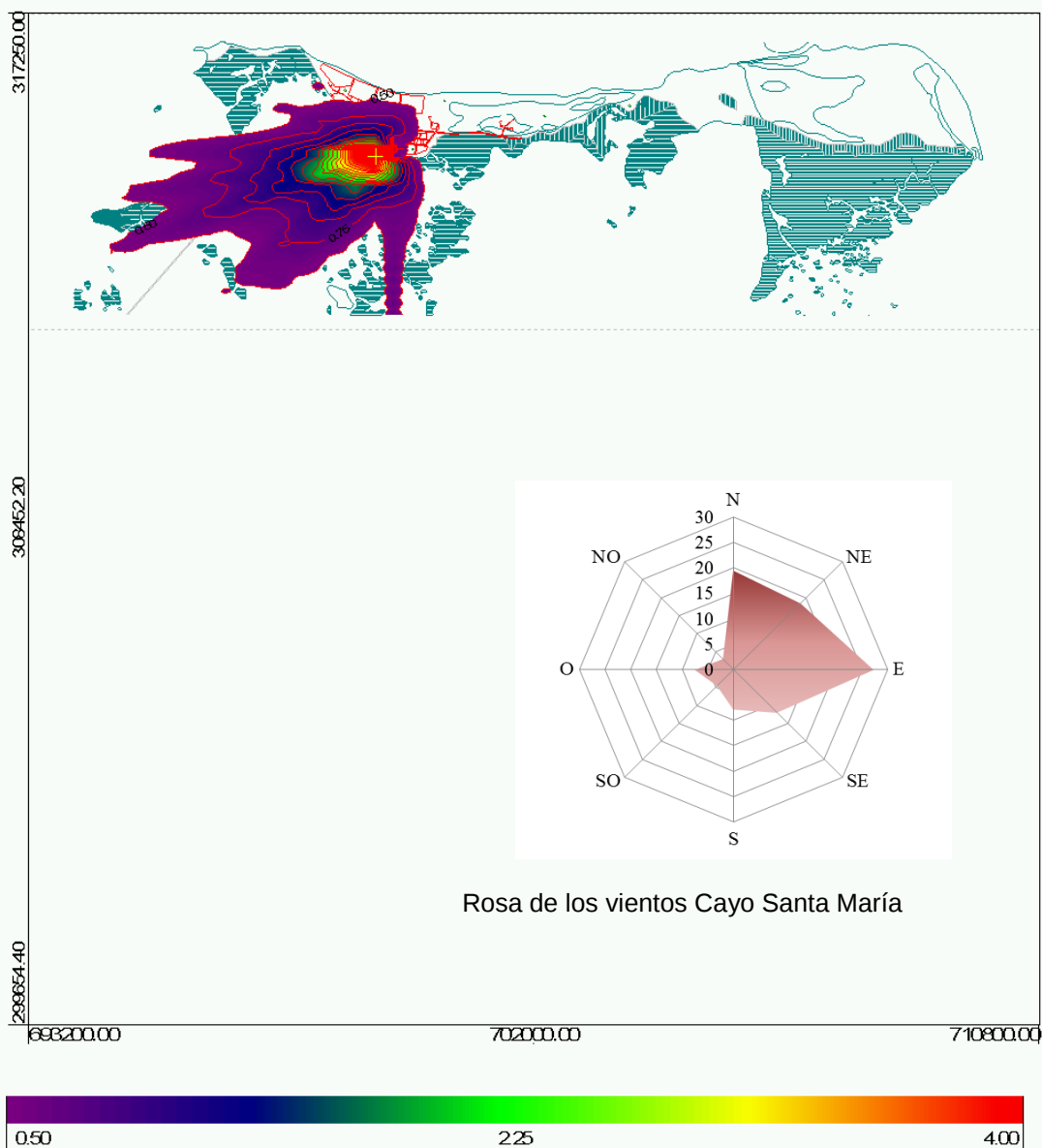


Anexo 4- Concentraciones de NOX para un año.

PROJECT NAME:

Impacto generación diésel MTU Cayo Santa María

PLOT FILE OF PERIOD VALUES FOR SOURCE GROUP: ALL



MODELING OPTIONS:

CONC, RURAL, FLAT, FLGPOL, DFAULT, NOCMPL

CEETA

OUTPUT TYPE:

CONC

RECEPTORS:

2106

Herrera I. & Felipe J. A

0 3 km

MAX:

7.04014

NOx:

ugm³

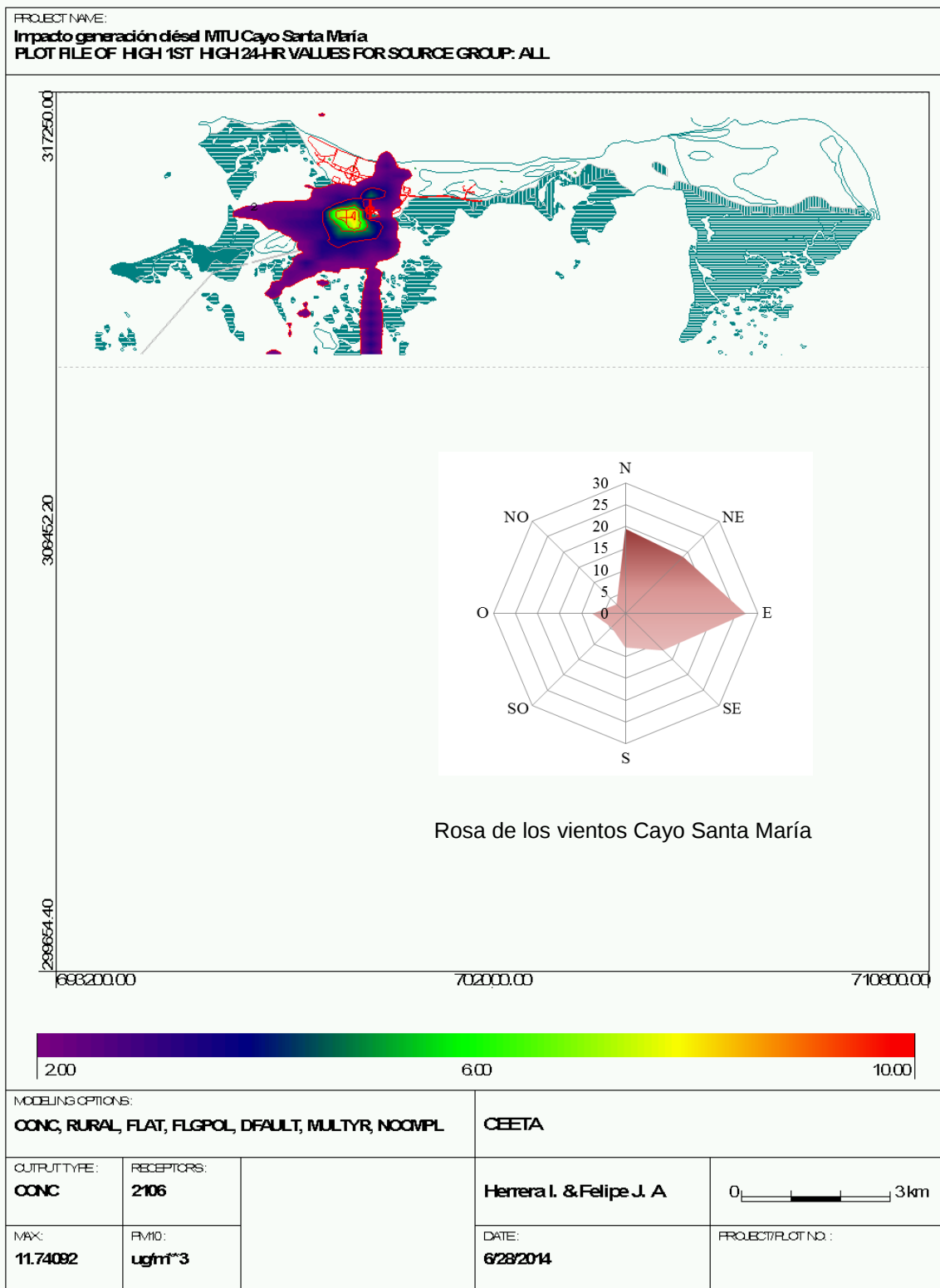
DATE:

6/28/2014

PROJECT/PLOT NO.:

ISC AERMOD View by Lakes Environmental Software

Anexo 5- Concentraciones de PM₁₀ para 24h.



ISC-AERMOD View by Lakes Environmental Software

Anexo 6- Concentraciones de PM₁₀ para un año.

