

DISEÑO DE UNA CABINA INSONORIZADA PARA EL GRUPO
ELECTRÓGENO EDO YS6000 REFRIGERADOS POR AIRE.

SANTIAGO MEJÍA LÓPEZ
SEBASTIÁN MUÑOZ DÁVILA

UNIVERSIDAD EAFIT
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
ÁREA DE DISEÑO
MEDELLÍN
2008

DISEÑO DE UNA CABINA INSONORIZADA PARA EL GRUPO
ELECTRÓGENO EDO YS6000 REFRIGERADOS POR AIRE.

SANTIAGO MEJÍA LÓPEZ
SEBASTIÁN MUÑOZ DÁVILA

Trabajo de grado para optar por el
título de Ingeniero Mecánico

Asesora:
Johanna Iriarte Lacera
Ingeniera Mecánica

UNIVERSIDAD EAFIT
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
ÁREA DE DISEÑO
MEDELLÍN
2008

AGRADECIMIENTOS

A Dios, a nuestros padres y hermanos, por su apoyo y paciencia.

A Cristian y Felipe por su amistad sincera.

A nuestra asesora, Ingeniera Lenny Johana Iriarte.

A Diego e Iván de la planta Eduardoño S.A.

A Carlos Marín de la planta Eduardoño S.A. por su paciencia y soporte constante.

A Nicolás Sierra, de DOBLAMOS S.A., por su ayuda incondicional.

A Juan Sebastián Vélez por su gran asesoría, docente de la Universidad EAFIT.

A la empresa Eduardoño por abrirnos sus puertas, por apoyo, confianza y servicio.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	9
1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	10
2 JUSTIFICACIÓN	11
3 OBJETIVOS	12
3.1 OBJETIVO GENERAL	12
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
4 ALCANCES	13
5 IMPORTANCIA DEL PROYECTO	14
6 ESTADO DEL ARTE	15
6.1 INSONORIZACIÓN	15
6.2 CABINAS DE INSONORIZACIÓN	17
6.3 MATERIALES ACÚSTICOS	20
7 EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES INICIALES	22
7.1 ANÁLISIS DE NIVEL DE RUIDO Y UNIDADES DE DECIBELES dB(A)	22
7.2 PRINCIPALES FUENTES DE GENERACIÓN DE RUIDO	25
7.3 MEDICIÓN DE POTENCIA	27
8 EVALUACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS DEL DISEÑO	32
8.1 DISEÑO FUNCIONAL	32
8.2 REQUISITOS Y DESEOS DEL SISTEMA	33
8.3 ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS	34
8.4 EVALUACIÓN DE PROPUESTAS	41

9	MODELO DE CÁLCULO	43
9.1	CÁLCULO DEL SISTEMA DE EXTRACCIÓN	43
9.2	CÁLCULO ESTRUCTURAL	52
9.3	BASE	54
10	VALIDACIÓN DE RESULTADOS	59
	CONCLUSIONES	63
	RECOMENDACIONES	66
	BIBLIOGRAFIA	67
	ANEXOS	70

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Nivel de ruido promedio.	23
Ecuación 2. Potencia	28
Ecuación 3. Nivel de ruido en función de la distancia.	28
Ecuación 4. Calor disipado	43
Ecuación 5. Coeficiente de convección en función del calor disipado.	44
Ecuación 6. Coeficiente de convección en función de Nusselt.	45
Ecuación 7. Correlación empírica de Hilpert	46
Ecuación 8. Correlación de Zhukauskas	46
Ecuación 9. Reynolds en función de la velocidad del aire.	47
Ecuación 10. Caudal en función del aire y velocidad de un fluido.	48
Ecuación 11. Área de paso de aire por el ventilador	50
Ecuación 12. Área de un círculo.	50
Ecuación 13. Peso en función de la masa y la gravedad	55
Ecuación 14. Sonido en decibelios en función de la intensidad del sonido en Watts	60
Ecuación 15. Porcentaje de reducción de ruido en dB	61
Ecuación 16. Porcentaje de reducción del ruido en Watt	62

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Sonómetro digital	20
Figura 2. Lámina mineral de Roca	21
Figura 3. Ruido generado por el grupo electrógeno estudiado en vacío y en presencia de carga	24
Figura 4. Escala de Ruido	25
Figura 5. Disminución del nivel de ruido con la distancia	29
Figura 6. Variación del sonido con respecto a la distancia de la fuente.	30
Figura 7. Cabina isonorizadora como caja negra	32
Figura 8. Diagrama de funciones del sistema	33
Figura 9. Propuesta 1	35
Figura 10. Propuesta 2.	36
Figura 11. Propuesta 3	37
Figura 12. Entrada y salida de aire en el alternador Sawafiji XA6500	38
Figura 13. Propuesta 4	39
Figura 14. Modelo al que se aproximó el motor para calcular el ventilador de refrigeración con aire forzado	44
Figura 15. Ventilador seleccionado.	49
Figura 16. Dimensiones del ventilador	49
Figura 17. Elementos de sujeción inicial de la máquina	52
Figura 18. Sistema de sujeción del diseño final	53
Figura 19. Cargas a las que estará sometido el chasis del generador.	54
Figura 20. Distribución del peso del generador	55

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Cabinas insonorizadas para generadores diesel	17
Tabla 2. Mediciones de presión sonora a 1m de distancia en cada una de las cuatro (4) caras principales del generador	22
Tabla 3. Condiciones iniciales de ruido del ambiente de planta de fabricación, nivel de ruido del generador con y sin carga	24
Tabla 4. Principales fuentes de ruido en el generador eléctrico a gasolina YS6000	26
Tabla 5. Parámetros de aprobación para generadores EDO YS6000	27
Tabla 6. Criterios de éxitos de la cabina insonorizada	30
Tabla 7. Requisitos y deseos del sistema a rediseñar	34
Tabla 8. Ventajas y desventajas propuesta 1.	36
Tabla 9. Ventajas y desventajas propuesta 2.	37
Tabla 10. Ventajas y desventajas alternativa 3.	39
Tabla 11. Ventajas y desventajas de la alternativa 4.	40
Tabla 12. Matriz morfológica de selección de alternativas	41
Tabla 13. Cuadro resumen de cálculo de refrigeración por extracción al interior de la cabina	51
Tabla 14. Cuadro resumen cálculo selección del ventilador	51
Tabla 15. Propiedades del material	56
Tabla 16. Enmallado de Chasis	56
Tabla 17. Valores máximos y mínimos de esfuerzos generados en el chasis	57
Tabla 18. Análisis por elementos finitos (FEA) del chasis	58
Tabla 19. Medición del ruido con cabina	59
Tabla 20. Validación de ruido y potencia	60

INTRODUCCIÓN

El ruido es una superposición de sonidos que provocan molestias para el oído humano y en caso de ser excesivo, puede producir efectos irreversibles sobre nuestro organismo.

Una de las formas más eficaces y comúnmente aplicadas para el manejo del ruido generado por plantas y motores consiste en la aislación de la fuente generadora de ruido valiéndose de medios como cabinas especialmente diseñadas que permiten la reducción del mismo.

El ruido puede ser un importante problema, sobre todo en lugares en los cuales se hace difícil, incómodo o poco prudente permitir niveles sonoros intolerables en establecimientos tipo bancos, oficinas, recintos cerrados entre otros. Las cabinas de insonorización permiten hacerle frente a este problema reduciendo el ruido a niveles aceptables que eviten efectos indeseables sobre el personal y permitan el cumplimiento de los niveles exigidos por la legislación dependiendo del tipo de lugar.

El rediseño del generador YS6000 pensando en la insonorización del mismo, conlleva a adaptar el sistema a condiciones deseables o por lo menos aceptables de ruido que permitan la entrada del producto a un mercado desatendido en Colombia. Por medio de este nuevo sistema de generación de energía eléctrica insonorizado, se logrará incursionar con un producto de calidad y respaldo en un sector al que anteriormente era poco probable satisfacer.

1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El proyecto pretende dar respuesta a una necesidad puntual de reducción del ruido de los generadores EDO. Como resultado, el diseño y construcción de una cabina de insonorización responderá a las expectativas de la empresa que actualmente comercializa este tipo de grupos electrógenos y se convertirá en un producto de línea con miras a cubrir una demanda existente.

La cabina de insonorización se diseñará básicamente para las características funcionales del actual generador EDO YS6000. Se espera lograr con la misma una reducción cerca del 30% de la emisión de ruido que podrá variar de forma indiferente con miras a la conservación y buen funcionamiento del equipo.

2 JUSTIFICACIÓN

El control de ruido y atenuación del mismo tanto a nivel industrial como doméstico, nace de la necesidad de mantener un ambiente de trabajo en condiciones óptimas para el desempeño de las diferentes labores.

Existen diversos tipos de contaminación por ruido y son innumerables las fuentes de producción del mismo. En el caso de la generación de energía para ser más específicos; la producida por plantas de combustión interna (diesel o gasolina), el ruido es producido por diferentes componentes de la máquina y juntos generan un nivel sonoro superior al permitido para recintos cerrados, oficinas, bancos y demás produciendo de esta forma una exclusión del sistema para estos escenarios.

Para empresas ensambladoras de generadores eléctricos a gasolina como es Eduardoño S.A., la entrada a este mercado se ve obstaculizada por el nivel de ruido generado por sus máquinas y de ahí la importancia de este proyecto, el cual busca encontrar una solución a ello valiéndose de herramientas de ingeniería que logren diagnosticar el problema y proponer una solución que abra las puertas a un mercado no explorado por la empresa.

Vale la pena decir que actualmente en Colombia, no existen cabinas insonorizadas para generadores a gasolina refrigerados por aire (YAMAHA) y a través de este proyecto, se desarrolla un producto que permite romper las barreras existentes entre la máquina y el mercado desatendido adaptando un producto estándar a las condiciones requeridas.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar una cabina insonorizada que logre una disminución de ruido superior al 30% de un generador EDO YS6000 sin afectar las condiciones mínimas requeridas para el buen funcionamiento del grupo electrógeno.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

3.2.1 Objetivo 1 Evaluación de las Condiciones Iniciales. Evaluar las condiciones iniciales del equipo a insonorizar para de esta forma tener una base real y establecer los parámetros de trabajo.

3.2.2 Objetivo 2 Evaluación de Alternativas. Evaluar alternativas de diseño que cumplan con los requisitos del sistema y seleccionar la que más se adecue a las necesidades.

3.2.3 Objetivo 3 Planos. Realizar planos de taller, subensambles y ensamble total del sistema de forma tal que sea posible su posterior manufactura.

3.2.4 Objetivo 4 Validación de Diseño. Validar las condiciones finales del diseño con el fin de verificar los requisitos y expectativas iniciales.

3.2.5 Objetivo 5 Realizar un manual de ensamble del producto final que permita de una manera fácil y efectiva, llegar a la construcción del equipo previamente diseñado.

4 ALCANCES

Con el presente proyecto se pretende lograr una solución efectiva para la reducción del ruido de los generadores EDO ensamblados nacionalmente por la empresa EDUARDOÑO S.A. El proyecto logrará llegar al diseño de una cabina insonorizada que será implementada en los grupos electrógenos YS6000.

Dentro del mismo diseño se contemplan los siguientes elementos:

Manual de ensamble de la cabina: Tutorial ilustrado que ejemplifique la forma correcta de ensamblar la cabina, precauciones de ensamble y chequeo final.

Estandarización del diseño: Cantidades y componentes estándar y no estándar que componen el producto final (YS6000 Silenciosa).

Ficha técnica del producto insonorizado.

5 IMPORTANCIA DEL PROYECTO

Eduardoño S.A. es una empresa con más de 60 años en el mercado incursionando y revolucionando el mismo con diferentes productos acorde a las nuevas tendencias. Una de sus líneas de negocio es la comercialización de maquinaria agrícola y soluciones de energía.

Gracias al estudio de mercado realizado y evaluado periódicamente por la empresa, se han detectado necesidades insatisfechas para los usuarios de generadores EDO de 6000W de potencia y de ahí la importancia del proyecto.

Usuarios cada vez más exigentes, reclaman un desarrollo que permita la reducción del ruido generado por el funcionamiento normal de los motores YAMAHA empleados para el ensamble de los generadores. Mediante este proyecto se pretende de una u otra forma dar una solución efectiva a la empresa que permita cumplir con los requerimientos y necesidades del mercado.

La reducción de ruido en generadores EDO con fines industriales y de comercialización se realiza como proyecto de grado y con miras a optar por el título de Ingeniero Mecánico. El presente permitirá además de ello, aplicar el conocimiento adquirido durante el pregrado a temas puntuales y de soluciones industriales requeridas por el mercado.

6 ESTADO DEL ARTE

El ruido es tal vez uno de los mayores contaminantes en el sector industrial y ambiental y no por los desechos que éste produzca, sino por el daño del sentido de la audición que puede generar a los seres humanos. Para dar un control a tal consecuencia, es importante controlar la generación de niveles altos de ruido en equipos y maquinaria industrial utilizada. (RUIDO@, 2008)

Éste es el caso del grupo electrógeno EDO YS6000 refrigerado por aire, el cual es aplicable en diferentes establecimientos privados, comerciales y demás que no pueden privarse del servicio eléctrico para operar normalmente. Se ha detectado en este sector que; pese a la necesidad del equipo, el ruido generado por el mismo es lo suficientemente molesto o intolerable para el lugar. Es por ello que se debe insonorizar la planta mencionada para lograr el objetivo de disminución del ruido como factor de riesgo industrial.

6.1 INSONORIZACIÓN

Insonorizar un recinto supone aislarlo acústicamente del exterior, lo que implica evitar que el sonido que produce la fuente generadora salga al exterior (evitar la contaminación acústica).

Es interesante tener en cuenta que si se reduce el nivel de ruido en un ambiente, también se reduce en los ambientes vecinos, aunque no mejore el aislamiento en sí.

Este aislamiento acústico se refiere al conjunto de materiales, técnicas y tecnologías desarrolladas para aislar o atenuar el nivel sonoro en un determinado espacio.

Así mismo, aislar presume impedir que un sonido penetre en un medio, o que salga de él. Por ello, se usan frecuentemente materiales absorbentes, como materiales aislantes. Al incidir la onda acústica sobre un elemento

constructivo, una parte de la energía se refleja, otra se absorbe y otra se transmite al otro lado. El aislamiento que ofrece el elemento es la diferencia entre la energía incidente y la energía transmitida, es decir, equivale a la suma de la parte reflejada y la parte absorbida.

Existen diversos factores básicos que intervienen en la consecución de un buen aislamiento acústico:

6.1.1 Factor másico. El aislamiento acústico se consigue principalmente por la masa de los elementos constructivos: a mayor masa, mayor resistencia opone al choque de la onda sonora y mayor es la atenuación. Razón por la cual, no conviene hablar de aislantes acústicos específicos, puesto que son los materiales normales, contrario a lo que ocurre con el aislamiento térmico.

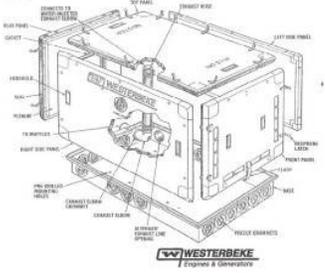
6.1.2 Factor multicapa. Cuando se trata de elementos constructivos constituidos por varias capas, una disposición adecuada de ellas puede mejorar el aislamiento acústico hasta niveles superiores a los que la suma del aislamiento individual de cada capa, pudiera alcanzar. Cada elemento o capa tiene una frecuencia de resonancia que depende del material que lo compone y de su espesor. Si el sonido (o ruido) que llega al elemento tiene esa frecuencia producirá la resonancia y al vibrar el elemento, producirá sonido que se sumará al transmitido. Por ello, si se disponen dos capas del mismo material y distinto espesor, y que por lo tanto tendrán distinta frecuencia de resonancia, la frecuencia que deje pasar en exceso la primera capa, será absorbida por la segunda.

6.1.3 Factor de disipación. También mejora el aislamiento si se dispone entre las dos capas un material absorbente. Estos materiales suelen ser de poca densidad y con gran cantidad de poros y se colocan normalmente porque además suelen ser también buenos aislantes térmicos. Así, un material absorbente colocado en el espacio cerrado entre dos tabiques paralelos mejora el aislamiento que ofrecerían dichos tabiques por sí solos. Finalmente, la reflexión del sonido puede atenuarse también colocando una capa de material absorbente en los paramentos de los elementos constructivos, aunque estas técnicas pertenecen más propiamente al ámbito de la acústica. (INSONORIZACION@, 2008)

6.2 CABINAS DE INSONORIZACIÓN

En el mercado existen variedad de grupos electrógenos con cabinas insonorizadas, sin embargo, en su mayoría son para motores DIESEL refrigerados por agua o diferentes sustancias químicas, los cuales son en su mayoría, de gran tamaño, aunque al momento de insonorizar todos presentan la misma filosofía, en la cual hay un encerramiento total del equipo y un aislamiento térmico de sus principales fuentes de calor.

Tabla 1. Cabinas insonorizadas para generadores diesel

<p>WESTERBEKE DIESEL GENERATOR MODELS 12.5 BTDB, 12.0 BTDC</p>  <p>WETERBEKE@2005</p>	<p>WESTERBEKE FOR DIESEL GENERATORS. SOUNDGUARDS</p>  <p>WETERBEKE@2005</p>
--	---

<p>GAMMA 7 KVA</p>  <p>GAMMA@2005</p>	<p>GENPOWER SERIE JOLLY PRO – SILENT</p>  <p>GENPOWER@2005</p>
<p>GENPOWER SERIE JOLLY PRO – SILENT</p>  <p>GENPOWER@2005</p>	<p>STOPSON INSONORIZACION</p>  <p>STOPSON@2005</p>

El ruido puede definirse como cualquier sonido no deseado que interfiere en la recepción de un sonido, producido por la mezcla de ondas sonoras de diferentes frecuencias y amplitudes generadas en variados niveles.

En la actualidad se encuentra entre los contaminantes más invasivos. El ruido del tránsito, de aviones, de camiones, de equipos y maquinarias de construcción, de industrias, etc., se encuentran entre los sonidos no deseados que se emiten a la atmósfera en forma rutinaria. Su problema no es el no ser deseado, sino que afecta negativamente la salud y el bienestar humanos. Conflicto cuyo control no es del todo suficiente en muchos casos

por la falta de conocimientos de los efectos nocivos que conlleva la exposición a él. (EXPOSICIÓN AL RUIDO@, 2007)

El ruido es un producto secundario en numerosos procesos y actividades industriales y sociales que, una vez generado, es transmitido a través de un medio elástico (generalmente el aire) hasta alcanzar el receptor. La respuesta de este receptor, considerado individualmente o como parte integrante de una comunidad, señalará los valores límites permisibles de ruido de cada situación particular, e indicará las acciones de control encaminadas a conseguir dichos límites.

Los aspectos a considerar en el planteamiento de una acción de control de ruido y acondicionamiento acústico contemplan:

Una fuente sonora definida por la potencia sonora que radia al medio que le rodea, el espectro sonoro, o mejor dicho, la distribución de la potencia sonora emitida en función de la frecuencia, y finalmente la dirección de la fuente.

En segunda instancia, la transmisión de las ondas sonoras, comprendiendo las características del medio en que se propagan las ondas sonoras, la absorción acústica de los distintos materiales existentes en el medio y la pérdida de transmisión de la energía acústica al cambiar de medio.

Finalmente el receptor caracterizado por la sensibilidad del individuo, función del nivel sonoro y la frecuencia, así como el tiempo de exposición al ruido.

El nivel sonoro se determina en decibeles (dB), en una relación matemática de tipo logarítmica, obtenidos al medir, mediante un sonómetro, la variación instantánea de la presión del aire al paso de una onda sonora.

Convencionalmente se ha fijado el umbral de audición a 0dB, siendo esta la mínima variación de presión audible, y el umbral de dolor a partir de 120 dB. Sin embargo, es preciso aclarar que el efecto del ruido sobre las personas

depende de su intensidad y de la distribución sobre la escala de frecuencias; el oído es más sensible a las frecuencias agudas que a las graves.

Para evaluar correctamente la sensación auditiva de las personas se dota al sonómetro de un sistema corrector, filtro de ponderación A, cuya sensibilidad varía del mismo modo que la del oído humano. La señal obtenida se expresa en decibelios A (dBA), unidad empleada en la actualidad en una amplia variedad de aplicaciones acústicas. (RUIDO@, 2008)

Figura 1. Sonómetro digital



RADIOHACK@2002

6.3 MATERIALES ACÚSTICOS

6.3.1 Absorción de ruido. La lana mineral de roca es muy eficiente como aislante de ruido por absorción debido a la estructura de fibras de celda abierta.

La textura esponjosa y elástica de la lana mineral sumada a su excelente densidad, le confieren la más alta capacidad de absorción acústica y reducción de ruidos en comparación con cualquier otro material aislante.

El material recomendado por el proveedor CALORCOL, para la aplicación y las condiciones dadas fue “Acustiplaca de lámina mineral de roca”¹.

Figura 2. Lámina mineral de Roca



CALORCOL®, 2007

Según el Anexo A (ficha técnica del producto) se puede apreciar como este material posee excelentes propiedades que aportan grandes beneficios al desarrollo de la aplicación, entre ellos la más importante es su bajo espesor en comparación a otros (1 1/2”) y su alto aislamiento de 15 a 45 dB(A).

¹ Ver ficha técnica ANEXO A: “Acustiplaca de Lámina Mineral de Roca”

7 EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES INICIALES

Para poder llevar a cabo el diseño del producto, es necesario inicialmente establecer las condiciones previas del grupo electrógeno, como también los requisitos para el diseño de la cabina respectivamente.

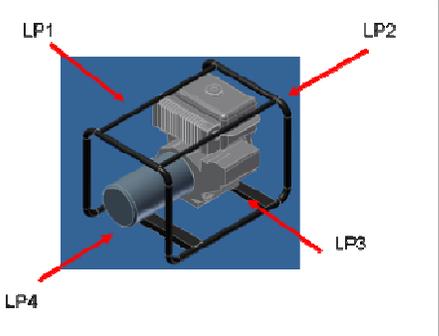
El grupo electrógeno o planta eléctrica está compuesto por:

- Motor Yamaha MZ360, refrigerado por aire. 4T Gasolina OHV. 78.2 dB(A) Nivel de ruido a 7m.
- Alternador Sawafuji 6500 W. 44 A.
- Tanque: 6.7 l.
- Marco metálico de protección y soporte
- Exhosto tipo: Muffler tail pipe (7RK-14746-00)

7.1 ANÁLISIS DE NIVEL DE RUIDO Y UNIDADES DE DECIBELES DB(A)

Para conocer el nivel de ruido que genera la planta, se realizaron mediciones del nivel de presión sonora en escala (A) a un metro de distancia en cada una de las caras del equipo, utilizando un sonómetro digital marca "RADIOHACK".

Tabla 2. Mediciones de presión sonora a 1m de distancia en cada una de las cuatro (4) caras principales del generador

Abreviatura	Posición de Medición	
LP1	Frente de la máquina	
LP2	Lado izquierdo	
LP3	Parte trasera	
LP4	Lado derecho	

Para encontrar el nivel promedio de ruido y siguiendo los requisitos de Salud Ocupacional en la empresa Eduardoño S.A, se empleó la siguiente ecuación la cual relaciona el ruido total con el ruido medido desde diferentes puntos a una misma distancia de la fuente para lograr de esta forma obtener el ruido promedio generado por la máquina.

Ecuación 1. Nivel de ruido promedio.

$$L_p = 20 * \text{Log} \left(\frac{10^{lp1/20} + 10^{lp2/20} + 10^{lp3/20} + 10^{lp4/20}}{4} \right)$$

Donde:

L_p : Ruido Promedio

$lp1$: Ruido generado en la cara 1 a 1m de distancia

$lp2$: Ruido generado en la cara 2 a 1m de distancia

$lp3$: Ruido generado en la cara 3 a 1m de distancia

$lp4$: Ruido generado en la cara 4 a 1m de distancia

7.1.1 Procedimiento de Medición

Las mediciones se realizaron de tres diferentes maneras enunciadas a continuación

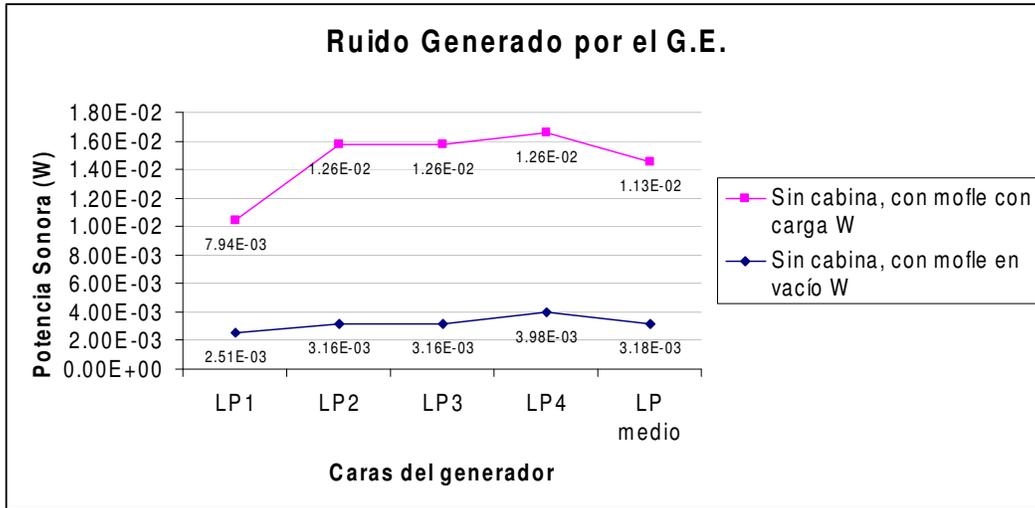
- Medición del nivel de ruido generado por el ambiente (planta de fabricación)
- Medición del nivel de ruido generado por el generador operando sin ningún tipo de carga (en vacío)
- Medición del nivel de ruido generado por el generador operando con carga máxima.

Los resultados de la práctica se muestran a continuación.

Tabla 3. Condiciones iniciales de ruido del ambiente de planta de fabricación, nivel de ruido del generador con y sin carga

	Ruido de fondo (Ruido Ambiente) W	Sin cabina, con mofle en vacío W	Sin cabina, con mofle con carga W
LP1	1.58489E-05	2.51E-03	7.94E-03
LP2	1.58489E-05	3.16E-03	1.26E-02
LP3	3.16228E-05	3.16E-03	1.26E-02
LP4	3.16228E-05	3.98E-03	1.26E-02
LP medio	2.30675E-05	3.18E-03	1.13E-02

Figura 3. Ruido generado por el grupo electrógeno estudiado en vacío y en presencia de carga

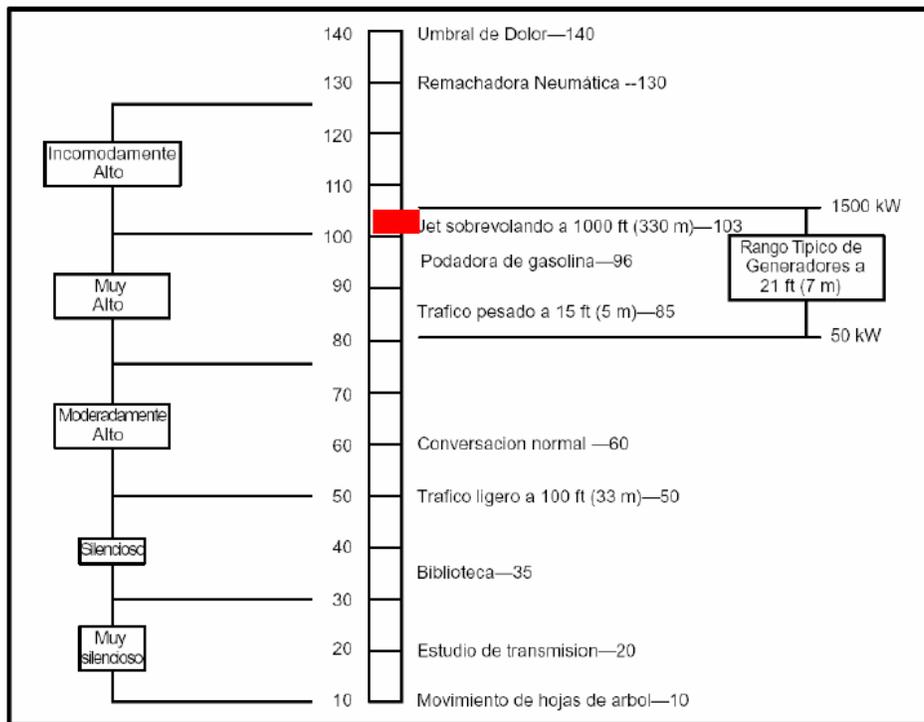


Según el valor anterior promedio o $L_{promedio}$ se puede establecer el nivel de sonido auditivo en el cual están expuestas las personas que laboran o

transitan alrededor del generador, es decir la percepción de ruido que se tiene según este valor.

Según lo estudiado, el ruido generado por el grupo electrógeno en mención, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, presenta un ruido técnicamente descrito como “incómodamente alto”.

Figura 4. Escala de Ruido



CUMMINS@, 2005

7.2 PRINCIPALES FUENTES DE GENERACIÓN DE RUIDO

De acuerdo a lo anterior, existen varios sistemas del equipo que se pueden considerar como los altos generadores del nivel sonoro, los cuales son los que deben atacarse:

Tabla 4. Principales fuentes de ruido en el generador eléctrico a gasolina YS6000

SISTEMA		TIPO DE RUIDO	POSIBLE SOLUCIÓN
Motor Yamaha MZ360		Mecánico	Cabina
Exosto		Neumático	Silenciador
Ajuste elementos de sujeción		Mecánico	Ajustar con tuercas de seguridad

Sin embargo, se debe tener en cuenta que la planta² o grupo electrógeno es refrigerada por aire, además se debe hacer todo lo posible para cumplir con los parámetros que a continuación se citan, logrando un óptimo funcionamiento:

- La temperatura a la entrada del aire de refrigeración debe ser menor a 40°C.
- La temperatura alrededor del carburador debe ser menor a 50°C.
- La temperatura de la toma de aire para el motor debe ser inferior a 40°C.
- Cuando se extiende el exosto no puede haber resistencia al flujo de gases.

² YAMAHA®, 2008

- Una extensión en el exhosto puede causar una caída de potencia en el motor.

7.3 MEDICIÓN DE POTENCIA

Los generadores YAMAHA pierden un 1% de potencia por cada 100 m de altura sobre el nivel del mar. Al estar en Medellín (1540 m) la potencia nominal entregada por el generador debe ser 5200 W.

El banco de pruebas para evaluación de generadores EDO está compuesto por diferentes tipos de resistencias como bombillos y motores de diferentes potencias de trabajo, los cuales se van activando uno a uno de forma tal que se le exija al grupo electrógeno su máxima potencia sin que los valores de frecuencia, velocidad, voltaje y corriente salgan del rango aprobado por la fábrica. Estos valores se muestran a continuación en la **Tabla 5**.

Tabla 5. Parámetros de aprobación para generadores EDO YS6000

Tensión 120V		Corriente Nominal 44A		Potencia Nominal 5650W		Velocidad 3600 RPM		Frecuencia Nominal 60 Hz	
Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
110	125	40	45	5200	--	3460	3800	58.2	62.4

Se realizaron mediciones de la potencia eléctrica entregada por el generador sin cabina y con carga obteniendo los siguientes resultados:

Las corrientes en las dos fases fueron de 21 y 23 A respectivamente y el voltaje fue de 119 V, valores que se encuentran en el rango del registro de pruebas y la frecuencia en 59 Hz.

Ecuación 2. Potencia

$$P = V * I$$

De donde :

P : Potencia [W]

V : Voltaje [V]

I : Intensidad [A]

Entonces,

$$P = 119v * (21A + 23A)$$

$$P = 5236W$$

7.3.1 Medición del nivel de ruido a diferentes distancias

El efecto que tiene la distancia en la propagación del ruido es inversamente proporcional, es decir en un campo libre el nivel de sonido decrece al aumentarse la distancia de la fuente.

Este caso obedece a que si se conoce el nivel de presión de sonido (SPL1) de una fuente a una distancia d1, el nivel de presión de sonido (SPL2) a d2 se puede encontrar como sigue:

Ecuación 3. Nivel de ruido en función de la distancia.

$$SPL_2 = SPL_1 - 20 * \log_{10} \left(\frac{d_2}{d_1} \right)$$

Donde:

SPL₁: Ruido a 1m de distancia

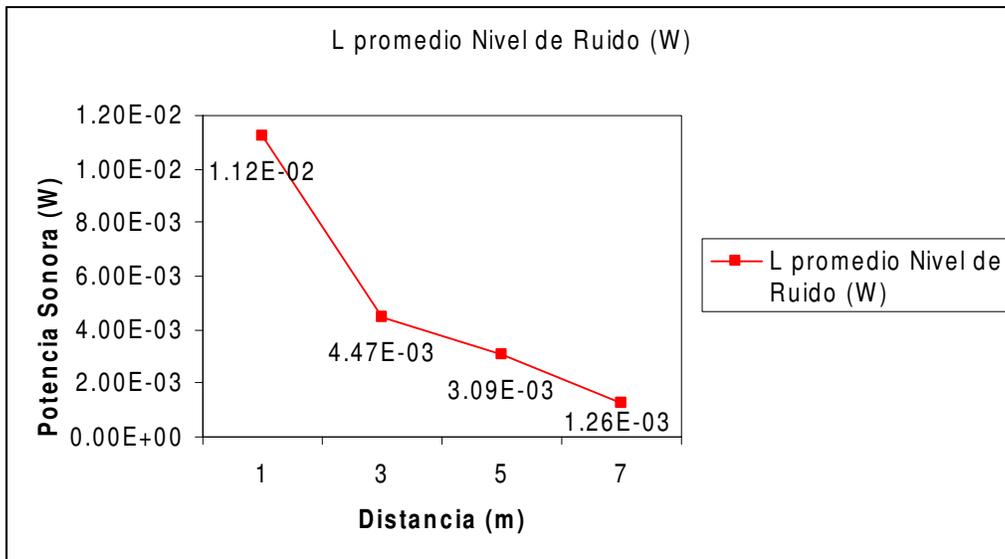
SPL₂: Ruido a 7m de distancia

d₁: Distancia 1 (1m)

d₂: Distancia 1 (7m)

Se realizaron mediciones a diferentes distancias obteniendo los siguientes resultados (Figura 5)

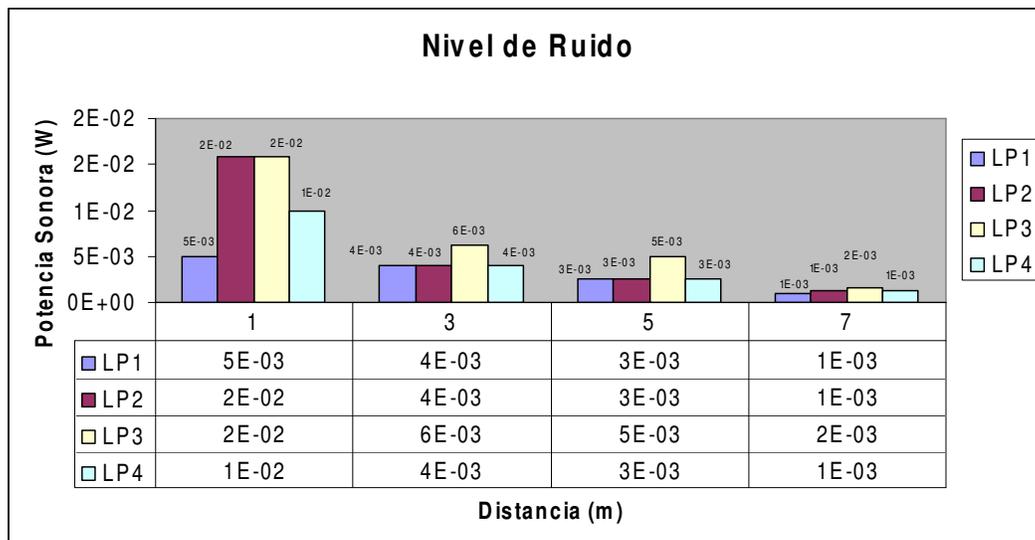
Figura 5. Disminución del nivel de ruido con la distancia



En la Figura 5 puede identificarse que el comportamiento no varía de acuerdo a la Ecuación 1, debido a que las mediciones no se hicieron en campo abierto como lo dice el modelo, sin embargo sí puede apreciarse la disminución del ruido con la distancia, aunque existan ciertos factores externos que obliguen a una generación de ciertas anomalías en la medición.

Para ver más a detalle la disminución del ruido con la distancia, la **Figura 4** puede representar en cada una de las caras de la planta los respectivos valores:

Figura 6. Variación del sonido con respecto a la distancia de la fuente.



Según los valores obtenidos anteriormente, para un buen funcionamiento del equipo, la cabina insonorizadora debe cumplir con las siguientes condiciones iniciales:

Tabla 6. Criterios de éxitos de la cabina insonorizadota

CONDICION	EQUIPO	VALOR
Insonorizar Motor	Motor	1.00E-05 W
Insonorizar Exhosto	Motor	
No generar ruido por ajuste de piezas de ensamble	Motor y generador	
Temperatura óptima de funcionamiento	Motor	<45°C

En la Tabla 6 puede verse cómo las condiciones obedecen a los sistemas mencionados en la **Tabla 4**, de lo que se infiere, que para poder realizar un diseño que cumpla con todos los parámetros debe existir un enfoque

netamente sobre estos valores, los cuales se podrán obtener si se ataca cada uno de los sistemas vistos, y lograr así un diseño que una cada uno de ellos.

8 EVALUACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS DEL DISEÑO

Para evaluar las diferentes alternativas de diseño de la solución con base en los requisitos y deseos del sistema, se hace indispensable el estudio funcional del mismo con miras a establecer claramente el correcto funcionamiento de la máquina y elegir la opción que más se adapte a lo requerido.

8.1 DISEÑO FUNCIONAL

8.1.1 Función principal. La cabina de insonorización tiene como función principal aislar los niveles de ruido (Insonorizar) evaluados anteriormente y que se generan por los componentes del sistema en funcionamiento.

Figura 7. Cabina isonorizadora como caja negra



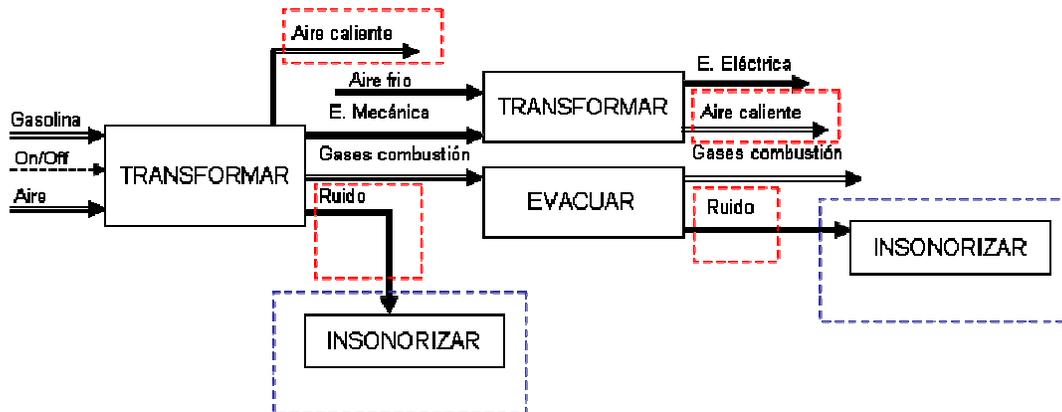
En la Tabla 4 se mencionó cuáles son los sistemas que juegan un papel muy importante dentro de la generación del nivel de ruido.

Para este caso los niveles generados por desajustes no son considerados, ya que el control de éstos se da gracias al buen mantenimiento del equipo, y el uso de elementos que absorban vibraciones para no tener desajustes.

Aparecen entonces dos piezas fundamentales para el sistema de insonorización, los cuales según los elementos mostrados en la Tabla 4 se pueden establecer como los más generadores de ruido.

Estos sistemas son complementarios entre sí, es decir para que la cabina pueda cumplir su función principal de insonorizar los sistemas ya relacionados deben interrelacionarse como se muestra a continuación:

Figura 8. Diagrama de funciones del sistema



Como se observa en la Figura 8, los dos generadores de ruido (Motor y Exhausto) deben ser insonorizados, como también debe evacuarse el aire caliente que se genera al enfriar la superficie del motor para obtener un buen desempeño del grupo electrógeno

8.2 REQUISITOS Y DESEOS DEL SISTEMA

Con base en el diseño funcional del grupo electrógeno, se establecen a continuación los requisitos y deseos del sistema con miras a la correcta selección de alternativas o propuestas.

Tabla 7. Requisitos y deseos del sistema a rediseñar

Descripción	Cuantificación	Requisito	Deseo
No exceder temperaturas de funcionamiento de la máquina	< 45° C	X	
Renovación del aire para refrigeración	5 m/s		X
Aislar salida de aire caliente con entrada de aire frío		X	
Reducción del nivel de ruido en un 30%	1.00E-05 W	X	
Fácil ensamble y desensamble			X
Fácil mantenimiento			X
Fácil manufactura de piezas			X
Bajo costo de materiales		X	
Facil movimiento del equipo		X	
Visualmente estético			X

8.3 ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS

Para el desarrollo de las alternativas, se realizaron modelos 3D, de tal forma que se pudiera analizar e interpretar todos los flujos y requisitos mencionados anteriormente. Se realizaron las modelaciones utilizando el software CAD AUTODESK INVENTOR 2008.

Este software es de suprema importancia para el diseño ya que con el buen uso del mismo se pueden dimensionar todas las piezas que harán parte del ensamble del producto final.

A continuación, se muestran las propuestas, analizando las ventajas y desventajas de cada una de ellas, esto es de de gran utilidad ya que en cada una de ellas se va cumpliendo con el diseño final que satisfaga todos los requisitos.

- Cabinar motor e incluir material acústico internamente

- Aislar térmicamente el exhosto y cabinar e incluir material acústico internamente
- Cabinar con material aislante toda la planta e incluir silenciador, incluyendo entradas y salidas de aire.
- Cabinado general de grupo electrógeno, sistema de extracción de aire caliente, silenciador, eliminación de marco como fuente de ruido por vibración.

8.3.1 Propuesta 1 Cabinar Motor e Incluir Material Acústico Internamente. El motor genera ruido debido a su funcionamiento mecánico, el cual no se puede controlar, por lo que su solución sería cabinar el equipo incluyendo el chasis.

El ruido neumático generado por el escape de los gases de combustión se podría controlar a su vez con la cabina. Se haría una salida de los gases del exhosto.

Figura 9. Propuesta 1

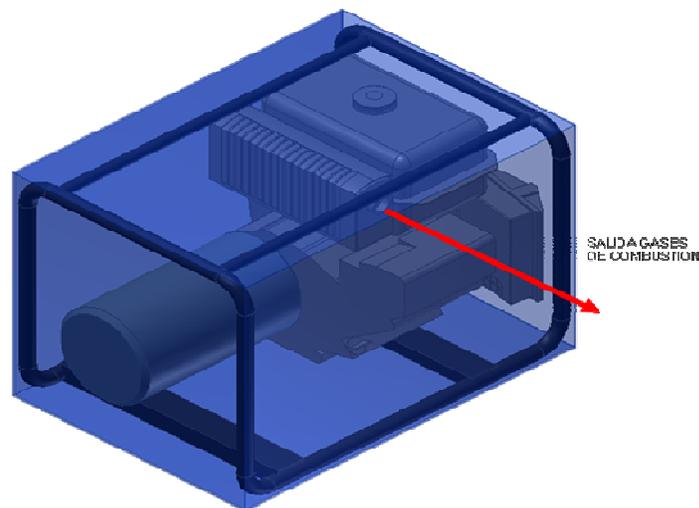
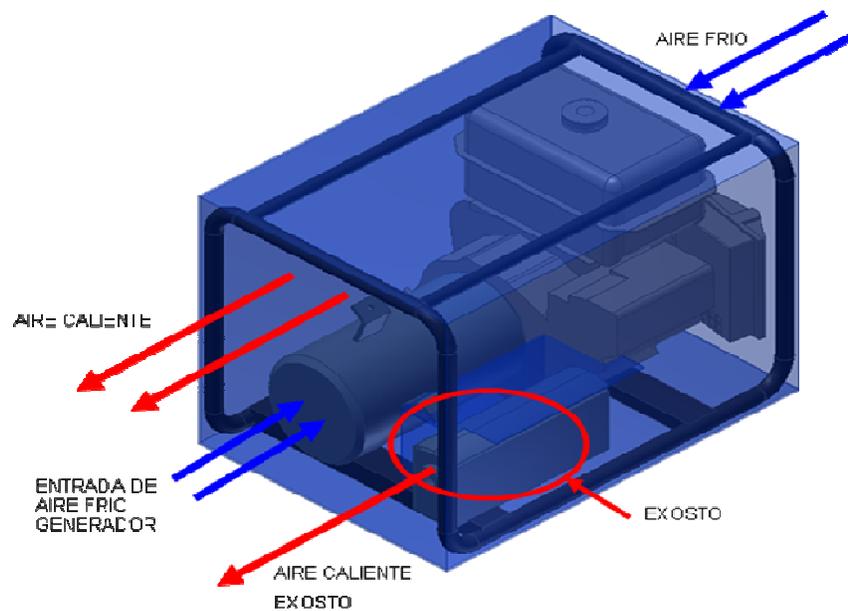


Tabla 8. Ventajas y desventajas propuesta 1.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<p>Al hacer una cabina a la planta se aísla el ruido generado por el motor y por el exhosto.</p> <p>Se controlaría el ruido con materiales acústicos densos para poder generar un mayor aislamiento.</p>	<p>No se cumpliría con el requisito de renovación de aire para poder refrigerar el aire con el cual se controla la temperatura del motor.</p> <p>No es una alternativa clara ya que no existiría un aislamiento térmico.</p>

8.3.2 Propuesta 2 Aislar Térmicamente el exhosto y cabinar e incluir material acústico internamente.

Figura 10. Propuesta 2.



Se cambia el exhosto de posición, se cabinan los dos sistemas generadores y se quitan las tapas laterales para incluir ventilación al interior del sistema. Se incluye el mismo chasis.

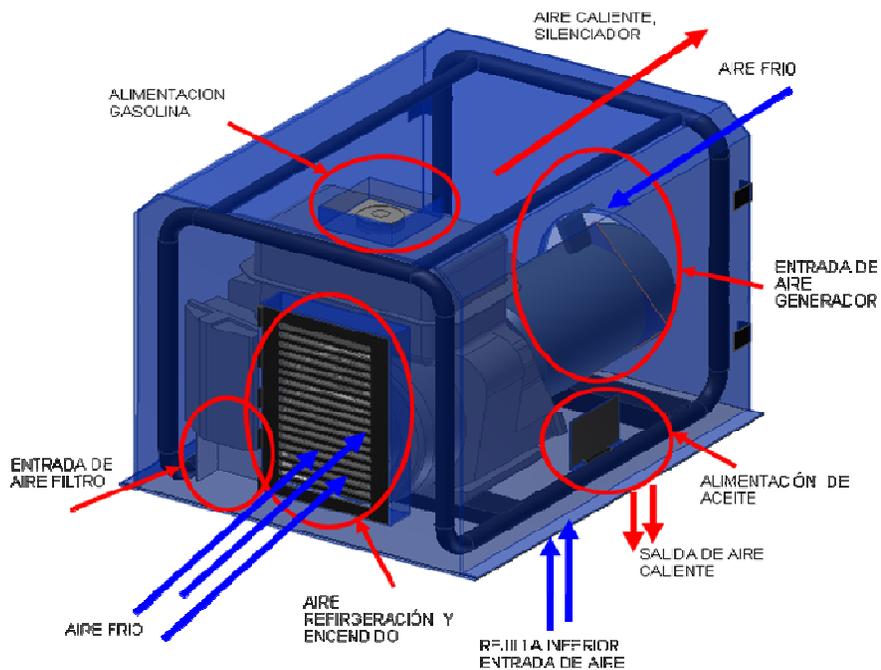
Tabla 9. Ventajas y desventajas propuesta 2.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Salida del aire caliente en la misma dirección.	Salida de aire caliente por toma de aire frío para el generador.
Menor temperatura al interior de la cabina.	Salida del ruido por los laterales.
	No hay control del ruido del exhosto.

Según las dos posibles soluciones anteriores, se pudo evidenciar que no había un control en la fuente para eliminar el ruido producido en los dos sistemas generadores de ruido ya mencionados. De acuerdo a la Tabla 7, se idealizó la siguiente alternativa.

8.3.3 Propuesta 3 Cabinar con material aislante todo la planta e incluir silenciador, incluyendo entradas y salidas de aire.

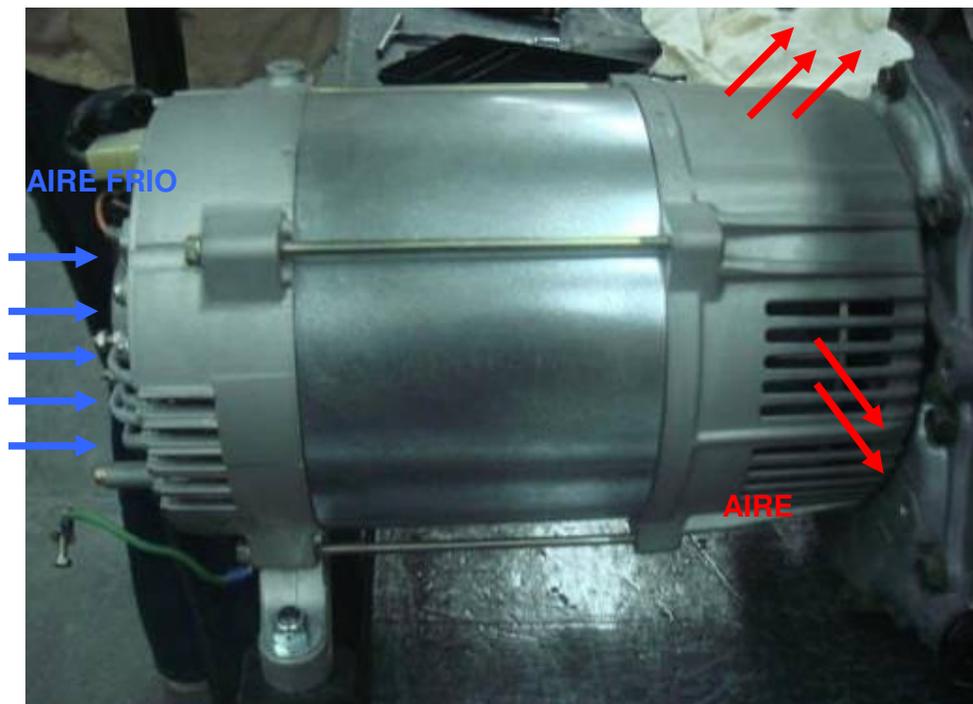
Figura 11. Propuesta 3



Para este modelo se incluyó el silenciador como también rejillas, las cuales permiten el flujo de aire al interior de toda la planta, desde la toma del motor hasta que atraviesa todo el equipo, arrastrando aire caliente al pasar por las aletas transfiriendo el calor proveniente del cilindro, este aire caliente saldría por la parte inferior de la cabina.

Otro punto muy importante es garantizar la entrada de aire al filtro para realizar la combustión, el área de entrada del motor para mantener el mismo caudal debe ser equivalente a 2340 mm^2 .³

Figura 12. Entrada y salida de aire en el alternador Sawafiji XA6500



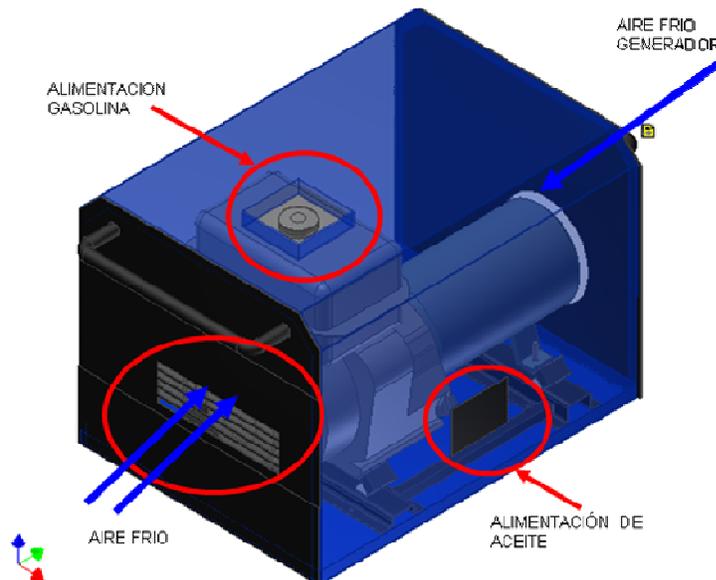
³ Es el equivalente al área de entrada del filtro de aire.

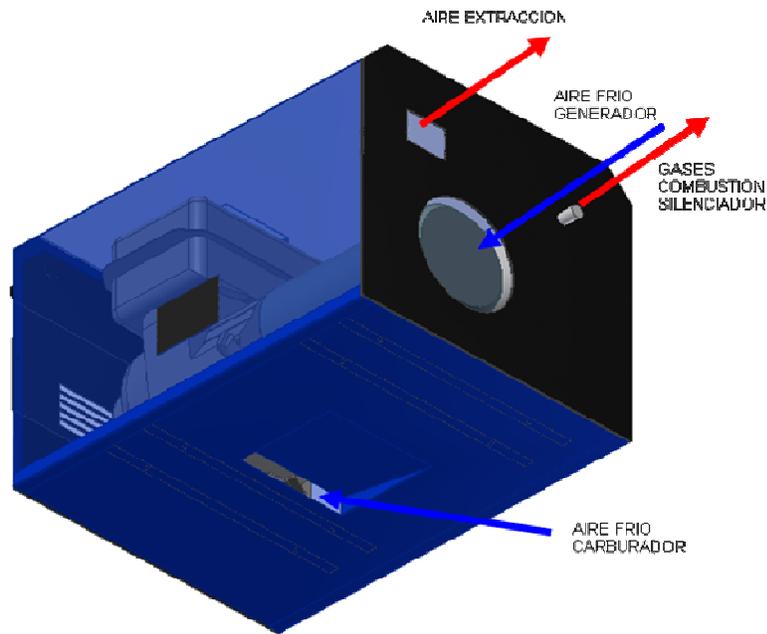
Tabla 10. Ventajas y desventajas alternativa 3.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<p>Disminución del ruido generado por el exhosto, al cambiarlo por un silenciador.</p> <p>Aislamiento acústico interiormente, permitiendo atrapar el ruido generado</p> <p>Flujo de aire al interior de la planta, permitiendo renovación del mismo.</p> <p>El filtro tiene entrada de aire constante</p>	<p>Tiro natural del aire, puede tener restricciones de flujo y recalentarse.</p> <p>El carburador no tiene entrada de aire frío.</p>

8.3.4 Propuesta 4 Cabinado general de grupo electrógeno, sistema de extracción de aire caliente, silenciador, eliminación de marco como fuente de ruido por vibración.

Figura 13. Propuesta 4





Para el anterior modelo o alternativa (Figura 13) se pensó en la posibilidad de cambiar el chasis con miras a la eliminación de posibles causas y generación de ruido por vibración de la estructura con la cabina.

Otro sistema adicional es la extracción de aire caliente mediante un extractor, así se garantiza la velocidad de renovación de aire.

Tabla 11. Ventajas y desventajas de la alternativa 4.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<p>Disminución del ruido generado por el exhosto, al cambiarlo por un silenciador.</p> <p>Aislamiento acústico interiormente, permitiendo atrapar el ruido generado</p> <p>Flujo de aire forzado al interior de la planta, permitiendo renovación del mismo.</p> <p>El filtro tiene entrada de aire constante.</p> <p>Disminución de materiales, por lo tanto costo.</p>	<p>Posible inestabilidad al cambiar el chasis.</p> <p>Dimensionamiento del extractor de aire caliente.</p>

8.4 EVALUACIÓN DE PROPUESTAS

Tabla 12. Matriz morfológica de selección de alternativas

DESCRIPCION	FACTOR DE PESO	ALTERNATIVA 1		ALTERNATIVA 2		ALTERNATIVA 3		ALTERNATIVA 4	
		PUNTAJE	PONDERADO	PUNTAJE	PONDERADO	PUNTAJE	PONDERADO	PUNTAJE	PONDERADO
Fácil ensamble y desensamble	0,15	3	0,45	4	0,6	3	0,45	4	0,6
Cantidad de piezas para manufactura	0,2	4	0,8	3	0,6	2	0,4	5	1
Extracción de flujos de aire caliente	0,1	0	0	4	0,4	4	0,4	5	0,5
Visualmente estético	0,1	2	0,2	3	0,3	4	0,4	4	0,4
Fácil Transporte	0,1	2	0,2	3	0,3	3	0,3	3	0,3
Tratamiento de disminución de ruido (Cabina y silenciador)	0,25	3	0,75	0	0	5	1,25	5	1,25
Entrada de aire para refrigeración	0,1	0	0	4	0,4	5	0,5	5	0,5
SUMA	1		2,4		2,6		3,7		4,55

Para el puntaje se calificó de 0 a 5, siendo 0 la calificación más baja.

De acuerdo a la Tabla 12 la propuesta que mas cumplió las necesidades y requisitos fue la número 4 y lo más importante es que los materiales o piezas a ensamblar que requiere son pocos en comparación con las demás. Como también el cumplimiento de los otros requisitos.

Otro punto que vale la pena resaltar es que esta propuesta es la única que tiene incorporado un sistema de extracción de aire para poder cumplir con la velocidad al interior de la planta.

9 MODELO DE CÁLCULO

9.1 CÁLCULO DEL SISTEMA DE EXTRACCIÓN

El generador sin cabina desde su fabricación, tiene como sistema de refrigeración convección libre, es decir, el aire que lo rodea. Pero como el diseño para la insonorización de la planta es hacer una cabina, se va a restringir drásticamente la entrada a temperatura ambiente y la salida del aire caliente, provocando un recalentamiento del equipo, lo que puede traer consigo una pérdida de la eficiencia hasta la falla de él como tal. De esta manera, se decidió poner un ventilador que forzara aire a temperatura ambiente a la cabina con el fin de renovar el aire al interior de ella manteniendo la velocidad requerida.⁴

Por otro lado, los motores de combustión interna a gasolina son de baja eficiencia, que se encuentra entre un 20 y 25% aproximadamente. Un 70% se va en calor y el resto se pierde en ruido y vibraciones.⁵

El generador eléctrico es una planta de gasolina capaz de entregar 6000 W a nivel del mar. Esto quiere decir, que los 6000 W que ofrece la planta es aproximadamente el 20% de la energía que produce la combustión. Por lo tanto el calor disipado es igual a:

Ecuación 4. Calor disipado

$$q = \frac{\text{Potencia que entrega la planta}}{\% \text{ Eficiencia}} \times \% \text{ Disipacion de calor} = \frac{6000W}{20\%} * 70\% = 21000W$$

El área que va a ser refrigerada es de 0.35 m². Este cálculo se determinó de la modelación realizada en Inventor, la cual entrega un dato muy aproximado para desarrollar el modelo de cálculo para la selección del ventilador.

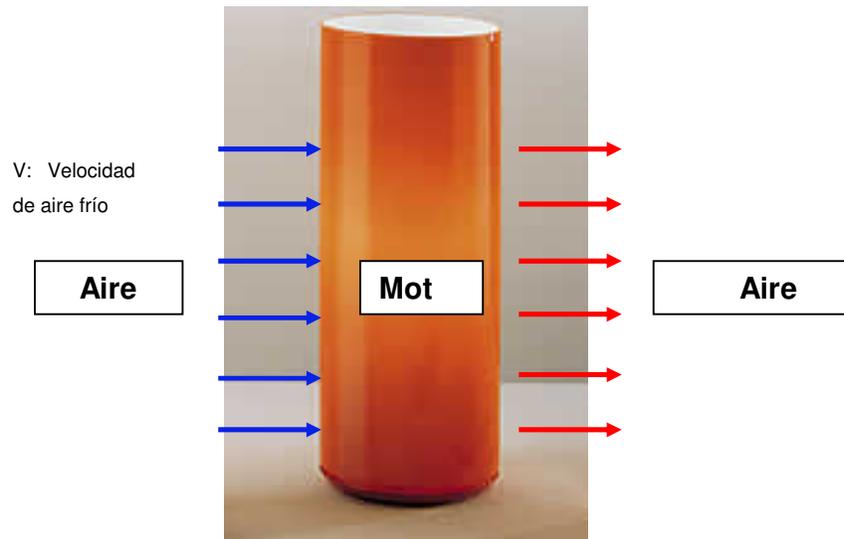
⁴ Se asume que el aire forzado cumple la misma función que el aire extraído.

⁵ INTERNAL COMBUSTION ENGINE @, 2008

Por diseño y especificaciones del motor, la temperatura de trabajo del mismo debe estar en 45°C y el aire que va a refrigerarlo está a temperatura ambiente, es decir, a unos 25°C en promedio en Medellín.

El siguiente paso consiste en calcular el coeficiente de convección (h) del aire con las características mencionadas anteriormente. Para ello, se tomó el modelo de cálculo de convección forzada para un cilindro con flujo cruzado. El cálculo de la velocidad que debe entregar el ventilador se muestra a continuación:

Figura 14. Modelo al que se aproximó el motor para calcular el ventilador de refrigeración con aire forzado



Ecuación 5. Coeficiente de convección en función del calor disipado.

$$h = \frac{q}{A(T_{\text{Superficie caliente}} - T_{\text{ambiente}})}$$

De donde :

$$q = 21000 \text{ W}$$

$$A = 0.35 \text{ m}^2$$

$$T_{\text{Superficie caliente}} = 45^\circ\text{C}$$

$$T_{\text{ambiente}} = 25^\circ\text{C}$$

Entonces,

$$h = \frac{21000 \text{ W}}{0.35 \text{ m}^2 (45^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C})} = 146230 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \times ^\circ\text{C}} = 146230 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \times \text{K}}$$

Ecuación 6. Coeficiente de convección en función de Nusselt.

$$h = Nu \times \frac{k}{D}$$

De donde:

h: Coeficiente de convección

Nu: Número adimensional de Nusselt

k: Coeficiente de conducción de la superficie refrigerada

D: Diámetro del cilindro (Motor aproximado a una geometría cilíndrica)

La superficie del motor, es fabricada de una aleación de aluminio que tiene como coeficiente de conducción (*k*).

Por lo tanto los valores que se tienen son:

$$h = Nu \times \frac{k}{D}$$

Despejando *Un* (Nusselt) se obtiene:

$$Nu = h \times \frac{D}{k}$$

De donde :

$$h = 146230 \frac{W}{m^2 \times K}$$

$D = 0.25 \text{ m} \Rightarrow$ Este diámetro se tomó aproximando el motor a un cilindro para efectos de cálculo

$k = 168 \frac{W}{m \times K} \Rightarrow$ Se obtiene de tablas y es específico para cada material, en este caso es para el aluminio

Entonces,

$$Nu = 146230 \frac{W}{m^2 \times K} \times \frac{0.25 \text{ m}}{168 \frac{W}{m \times K}} = 217.6$$

Ecuación 7. Correlación empírica de Hilpert

$$Nu = C \times Re^m \times Pr^{1/3}$$

$$0.7 < Pr < 500$$

$$1 < Re < 10^6$$

De donde :

C : Es número que se encuentra en tablas y depende de Re

Re : Número Adimensional, Reynolds. Se utiliza para determinar si un fluido está régimen laminar o turbulento.

m : Constante de la ecuación, depende de Re

Pr : Número adimensional, Prandtl.

Ecuación 8. Correlación de Zhukauskas

$$Nu = 0.3 + \frac{0.62 \times Re_D^{1/2} \times Pr^{1/3}}{\left[1 + (0.4/Pr)^{2/3}\right]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re_D}{282000}\right)^{5/8}\right]^{4/5}$$

La Ecuación 7 y **Ecuación 8** sirven para calcular el Nu (Nusselt) de dos formas diferentes. Ambos son modelos empíricos y dan resultados muy aproximados. Sin embargo, como lo que se está calculando es el Re (Reynolds), la **Ecuación 7** no aplica, ya que se tienen 3 incógnitas: Re, y C y m que dependen de Re. Mientras que en la Ecuación 4 se cuenta con todos los datos, Nu y Pr (Prandlt) que se encuentran en tablas y que además dependen de la temperatura. El Pr para el aire a temperatura ambiente es:

$$Pr = 0.707$$

Con el Nu de 217.6 encontrado con la Ecuación 5, se despeja Re de la Ecuación 7, teniendo que:

$$Re = 101820$$

Existe una ecuación que relaciona el Re con la velocidad del aire:

Ecuación 9. Reynolds en función de la velocidad del aire.

$$Re = \frac{VD}{\nu}$$

De donde

Re : Número adimensional Reynolds

V : Velocidad del fluido (Aire)

D : Diámetro del cilindro

ν : Viscosidad del fluido, aire a 25°C

Despejando la velocidad⁶ como sigue:

$$V = \frac{Re \times v}{D}$$

De donde

$$Re = 101820$$

$$D = 0.25 \text{ m}$$

$$v = 15.89 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

Entonces,

$$V = \frac{101820 \times 15.89 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}}{0.25 \text{ m}} = 6 \text{ m/s}$$

Lo que quiere decir, que para lograr un buen funcionamiento del motor, se debe instalar un ventilador que le entregue aire a temperatura ambiente, 25 °C en promedio, a una velocidad de 6 m/s.

Para la selección del ventilador óptimo, se decidió ir a los catálogos y confrontar el caudal de aire que entrega con el caudal mínimo necesario para la correcta operación de la planta. Este cálculo se hizo teniendo en cuenta la siguiente ecuación:

Ecuación 10. Caudal en función del aire y velocidad de un fluido.

$$Q = A \times V$$

De donde :

$$Q: \text{Caudal [m}^3/\text{s]}$$

$$A: \text{Área del ventilador por donde pasa el aire [m}^2\text{]}$$

$$V: \text{Velocidad [m/s]}$$

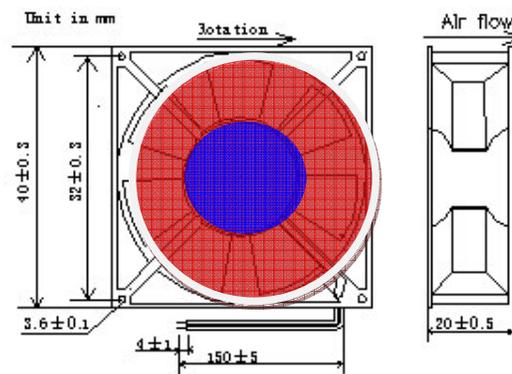
⁶ INCOPERA Y DEWIT, 1999

Se seleccionó el ventilador Modelo FD4020D05MS que se muestra a continuación:

Figura 15. Ventilador seleccionado.



Figura 16. Dimensiones del ventilador⁷



Para encontrar el caudal mínimo necesario para la operación de la planta, de acuerdo con la Ecuación 10, se debe conocer la velocidad mínima necesaria del aire, la cual fue calculada y equivale a 6m/s; además, el área de paso del

⁷ Ver Anexo B

aire por el ventilador. Ésta se puede obtener restándole el área azul a la roja, como se observa en la Figura 16, de la siguiente forma:

Ecuación 11. Área de paso de aire por el ventilador

$$A_{PASO\ AIRE} = A_{ROJA} - A_{AZUL}$$

Por geometría se tiene que el área de un círculo se calcula de la siguiente manera:

Ecuación 12. Área de un círculo.

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

De donde :

A : Área [m^2]

D : Diámetro [m]

Teniendo como datos el diámetro del círculo rojo, 0.04m, y del azul, 0.02m, y la Ecuación 11 y Ecuación 12, se puede decir lo siguiente:

$$A_{PASO\ AIRE} = \frac{\pi D_{ROJO}^2}{4} - \frac{\pi D_{AZUL}^2}{4}$$
$$A_{PASO\ AIRE} = \frac{\pi (D_{ROJO}^2 - D_{AZUL}^2)}{4}$$

Entonces,

$$A_{PASO\ AIRE} = \frac{\pi ((0.04m)^2 - (0.02m)^2)}{4}$$
$$A_{PASO\ AIRE} = 0.0003m^2$$

Regresando a la Ecuación 10, se tiene lo siguiente:

$$Q_{Necesario} = A \times V_{Necesaria}$$

$$Q_{Necesario} = 0.0003m^2 \times 6m/s$$

$$Q_{Necesario} = 0.027 m^3/s$$

$$Si 1m^3/s = 2118 CFM$$

Entonces,

$$Q_{Necesario} = 4.3 CFM$$

El caudal ofrecido por el ventilador es de 6.1 CFM de acuerdo al catálogo (Ver Anexo B), que entrega más de lo necesario, 4.3 CFM, lo que quiere decir que este ventilador es el adecuado para la operación de la planta.

Tabla 13. Cuadro resumen de cálculo de refrigeración por extracción al interior de la cabina

	VARIABLE	VALOR	UNIDAD
Potencia aprovechada		6000	W
Eficiencia del motor		20%	%
Calor disipado	Q	21000	W
Área Refrigerada	A	0,35	m ²
Temperatura de trabajo del motor	Ts	45	°C
Temperatura ambiente	T _∞	25	°C
Coeficiente de Convección	H	146230	W/(m ² *K)
Coeficiente de Conducción	K	168	W/(m*K)
Diámetro	D	0,25	m
Nusselt	Nu.	217,6	
Prandtl a 25°C	Pr	0,707	
Viscosidad a 25°C	N	1,59E-005	m ² /s
Reynolds	Re	101820	
Nusselt	Nu.	217,6	
Velocidad flujo de aire	V	6	m/s

Tabla 14. Cuadro resumen cálculo selección del ventilador

	VARIABLE	VALOR	UNIDAD
Diámetro (m)	D	0.04	m

Area (m2)	A	0.00031416	m2
Caudal mínimo (m3/s)	Q	0.00203313	m3/s
Caudal mínimo (CFM)	Q	4.3	CFM
Caudal entregado (CFM)	Qe	6.1	CFM
Caudal entregado (m3/s)	Qe	0.00288008	m3/s

9.2 CÁLCULO ESTRUCTURAL

A la propuesta elegida se le realizó un cambio muy importante en lo que es la estructura del sistema.

Este cambio es el chasis del motor y el generador, el cual no estaría unido a la tubería del modelo inicial sino a una base con soportes nuevos. Sin embargo toda la carga generada por el torque del motor está aplicada directamente en los soportes, como se ve en la Figura 18.

Figura 17. Elementos de sujeción inicial de la máquina

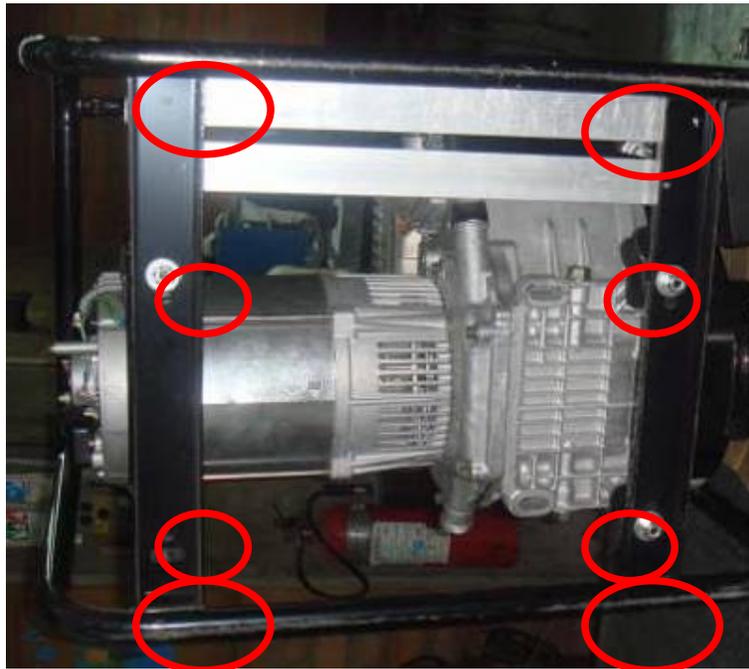
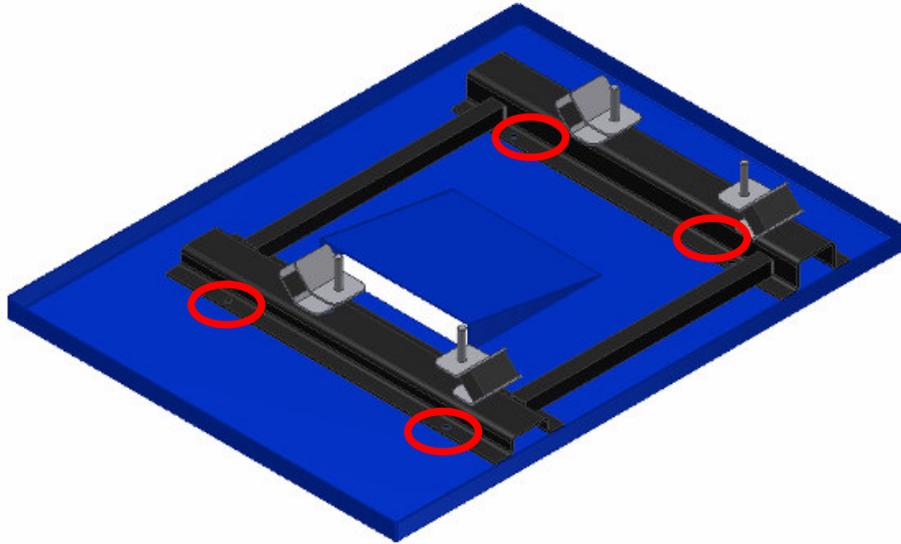


Figura 18. Sistema de sujeción del diseño final



Los cálculos del nuevo chasis y soportes se realizaron por medio de métodos de elementos finitos (FEA). Utilizando la aplicación de Stress Analysis de Autodesk Inventor 2008.

A continuación se muestra el comportamiento de los componentes del chasis bajo el efecto de las cargas y restricciones a las que están expuestas cada una de estas.

Los resultados del análisis de diseño están basados en un análisis estático lineal.

Para resolver el problema se asumió que:

- El comportamiento del material es lineal, en consonancia con la ley de Hooke.
- Los desplazamientos inducidos son lo suficientemente pequeños como para pasar por alto los cambios en la rigidez debidos a las cargas.
- Las propiedades del material no cambian a través del volumen del mismo.

- El material es isotrópico.

9.3 BASE

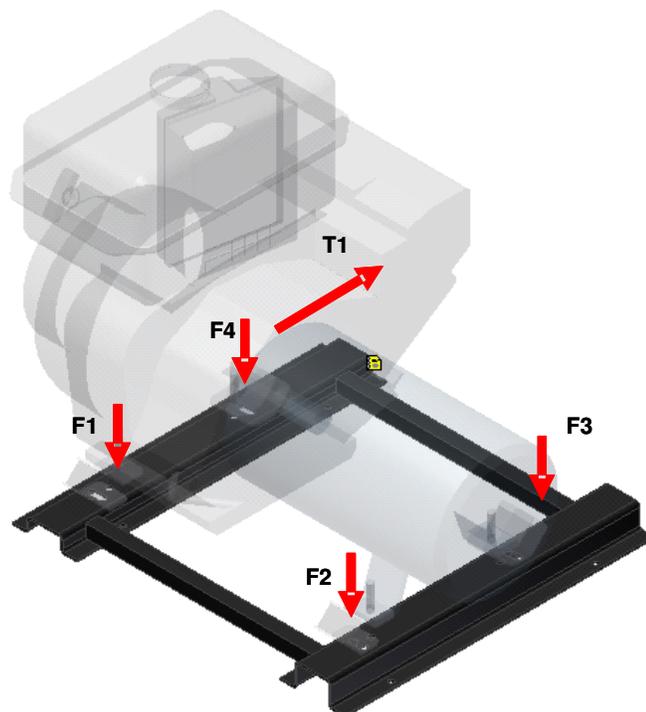
Para efectos prácticos, el soporte del motor y del generador se analizarán como una sola parte, es decir como un solo elemento, ya que estos dos elementos deben soportar la mayor carga que es producida en el funcionamiento del motor.

No se considerarán vibraciones ya que el motor y el generador se soportan a la base por medio de amortiguadores (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) los cuales asumirían estas cargas.

Este soporte o chasis estará soportado mediante pernos de sujeción sobre una lámina. La cual cumple la función de aislar el ruido y de proporcionar la toma del aire de la cabina.

Las cargas a las que estará sometido se muestran a continuación

Figura 19. Cargas a las que estará sometido el chasis del generador.



Las cargas se distribuyen de la siguiente manera:

Peso del grupo electrógeno con gasolina (6.7 l de capacidad del tanque):

Ecuación 13. Peso en función de la masa y la gravedad

$$W = m \times g$$

De donde:

W : Peso [N]

m : Masa [gr]

g : Gravedad [m/s^2]

Entonces,

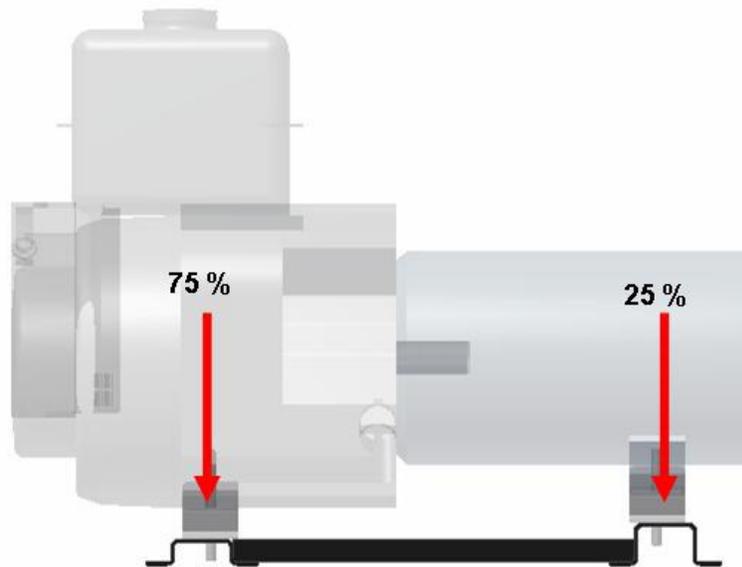
$$W_{electr} = 70 \text{ kg} * 9.81 \text{ m/s}^2 = 686.7 \text{ N}$$

$$W_{gas} = 6.7 \text{ l} * 0.68 \text{ gr/cm}^3 * 9.81 \text{ m/s}^2 = 447 \text{ N}$$

$$W_t = W_{electr} + W_{gaso} = 1133.64 \text{ N}$$

Se asume que el peso total del equipo se distribuye como se muestra a continuación:

Figura 20. Distribución del peso del generador



Por lo tanto las cargas a las que se somete el sistema corresponden a:

$$F1 = F2 = 425.12N$$

$$F3 = F4 = 414.7$$

$$T1 = 24.5N\cdot m @ 2,500rpm, \text{ este torque se traslado a } F4. \text{ (YAMAHA@,2008)}$$

Las propiedades del material usado (Acero AISI/SAE 1020) son:

Tabla 15. Propiedades del material

ACERO AISI SAE 1020	
Modulo de Young	210 GPa
Relación de Poisson	0,3
Densidad	7,85e-006 kg/mm ³
Esfuerzo de fluencia	207,0 MPa
Esfuerzo máximo	345,0 MPa

Para el análisis FEA se seleccionó una malla estándar de tal forma que los elementos tetraedros se distribuyan uniformemente en toda la pieza, la relevancia del enmallado fue de 100%, para poder garantizar el enmallado más fino y una confiabilidad del 100% sobre los resultados que entrega el análisis.

La información se muestra como sigue:

Tabla 16. Enmallado de Chasis

ENMALLADO CHASIS	
Masa de pieza	4,183 kg
Volumen de la pieza	5,328e+005 mm ³
Relevancia de la malla	100
Nodos	34843
Elementos	16742

Los resultados del análisis de esfuerzos se muestran a continuación, en la Tabla 17; donde se involucran los valores máximos y mínimos.

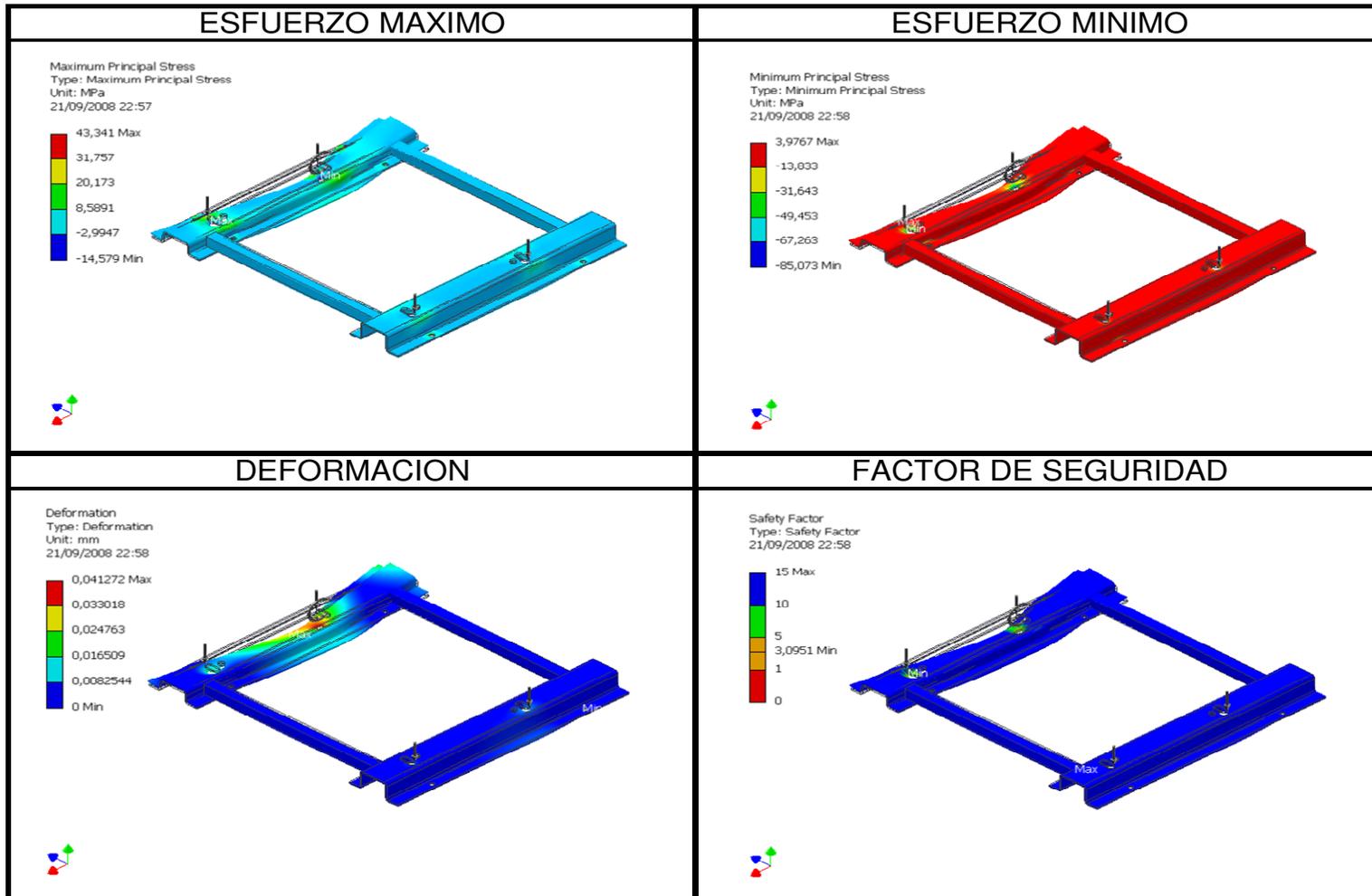
Tabla 17. Valores máximos y mínimos de esfuerzos generados en el chasis

NOMBRE	MINIMO	MAXIMO
Esfuerzos Combinados	1,041e-003 MPa	66,88 MPa
Esfuerzo Máximo Principal	-14,58 MPa	43,34 MPa
Esfuerzo Mínimo Principal	-85,07 MPa	3,977 MPa
Deformación	0,0 mm	4,127e-002 mm
Factor de Seguridad	3,095	-

Como se puede observar el material AISI/SAE 1020 y el espesor (1/8 in), son muy adecuados. Se puede identificar claramente que según las propiedades del material y las cargas a las cuales se sometieron, (que de alguna forma son valores máximos pues estos no son de condiciones normales de operación del equipo) se obtiene un valor mínimo de factor de seguridad igual a 3.

Este valor es alto, sin embargo da a entender lo seguro que es el uso de esta geometría para la aplicación.

Tabla 18. Análisis por elementos finitos (FEA) del chasis



10 VALIDACIÓN DE RESULTADOS

Después de haber construido el modelo propuesto se realizaron los ensayos pertinentes para la validación del diseño.

En la Tabla 19 se muestran los resultados de la medición del ruido realizada con el sonómetro digital marca RADIOSHACK a la propuesta construida.

Tabla 19. Medición del ruido con cabina

	Sin cabina, con silenciador en vacío W 1m de la fuente	Con cabina, con silenciador con carga W 1m de la fuente	Con cabina, con silenciador con carga W 7m de la fuente
LP1	3.16E-04	6.31E-04	1.58E-04
LP2	2.51E-04	5.01E-04	3.16E-04
LP3	2.00E-04	3.98E-04	2.51E-04
LP4	2.51E-04	6.31E-04	2.00E-04
LP medio	2.51E-04	5.01E-04	2.51E-04

Los resultados de medición de potencia realizados en el banco de pruebas arrojaron los siguientes resultados basándose en la Ecuación 2

$$P = V * I$$

De donde:

P: Potencia [W]

V: Voltaje [V]

I: Intensidad [A]

Entonces,

$$P = 122v * (20A + 22A)$$

$$P = 5236W$$

Tabla 20. Validación de ruido y potencia



Uno de los criterios de éxito de la función de la cabina es lograr reducir en 30% el nivel de ruido que produce la cabina en máxima carga. La medición del equipo sin cabina con máxima carga a 1 m de distancia generó 100.5415 dB(A).

Luego de la construcción de la cabina y el silenciador, el equipo volvió a ser medido y produjo 87 dB(A) en promedio, bajo las mismas condiciones en que se hizo la medición anterior. Debido a que el Decibelio (dB) es una unidad logarítmica implica que cada dB marginal más, es mayor que el dB marginal inmediatamente anterior. Se denota en la siguiente expresión:

Ecuación 14. Sonido en decibelios en función de la intensidad del sonido en Watts

$$L_w = 10 \times \text{Log} \left(\frac{W_1}{W_0} \right)$$

De donde,

L_w : Nivel de potencia ruido [dB]

W_1 : Potencia a estudiar [W]

W_0 : Potencia umbral de audición, equivale a 1×10^{-12} W

Se utiliza una escala logarítmica porque la sensibilidad que presenta el oído humano a las variaciones de intensidad sonora sigue una escala aproximadamente logarítmica, no lineal⁸.

Sin embargo, la reducción de sonido va a ser evaluada en término del porcentaje de Watts reducidos.

Con las condiciones iniciales, es decir, sin cabina y carga máxima se tiene el siguiente resultado:

$$100.5415 \text{ dB} = 10 \times \text{Log} \left(\frac{W_1}{1 \times 10^{-12} \text{ W}} \right)$$

Entonces,

$$W_1 = 0.0113 \text{ W}$$

Con la cabina insonorizadora y carga máxima se logra:

$$87 \text{ dB} = 10 \times \text{Log} \left(\frac{W_1}{1 \times 10^{-12} \text{ W}} \right)$$

Entonces,

$$W_1 = 0.0005 \text{ W}$$

Calculando el porcentaje de reducción del ruido con las unidades en dB se obtiene lo siguiente:

Ecuación 15. Porcentaje de reducción de ruido en dB

$$\%_{\text{Reducción ruido}} = \frac{dB_{\text{sin cabina}} - dB_{\text{con cabina}}}{dB_{\text{sin cabina}}} \times 100\% = \frac{100.5415 \text{ dB} - 87 \text{ dB}}{100.5415 \text{ dB}} \times 100\% =$$

$$\%_{\text{Reducción ruido}} = 13.47\%$$

Calculando el porcentaje de reducción de ruido con las unidades en Watts se obtiene lo siguiente:

⁸ Decibelio@, 2008

Ecuación 16. Porcentaje de reducción del ruido en Watt

$$\begin{aligned} \%_{\text{Reducción ruido}} &= \frac{W_{\text{sin cabina}} - W_{\text{con cabina}}}{W_{\text{sin cabina}}} \times 100\% = \frac{0.0113 \text{ W} - 0.0005 \text{ W}}{0.0113 \text{ W}} \times 100\% = \\ \%_{\text{Reducción ruido}} &= 95.57\% \end{aligned}$$

Se puede aclarar que la reducción real de la intensidad del ruido fue de un 95.57%, pero para el oído humano por su manera de percibir el ruido es del 13.47%.

CONCLUSIONES

De los inicios en la experiencia en el diseño de la ingeniería mecánica, puede reconocerse que es posible llevar un objeto deseado como en este caso, la cabina insonorizadora, a la vida real para suplir necesidades o mejorar fallos en la industria.

El control del ruido es un problema crítico para empresas que se ven interrumpidas por el nivel de ruido de sus equipos ó máquinas, motivo suficiente para evaluar sistemas técnicos de ingeniería en el desarrollo de productos y herramientas que prevengan niveles sonoros superiores a los permitidos según la normatividad de seguridad industrial y ocupacional.

Se cumple satisfactoriamente con el diseño de la cabina insonorizadora, logrando una disminución del ruido con un porcentaje esperado, sin afectar los parámetros mínimos requeridos para el funcionamiento del grupo electrógeno.

Luego de evaluar las condiciones de la cabina insonorizadora construida, se aceptan los resultados obtenidos de la medición del ruido, teniendo en cuenta los decibeles hasta los que una persona normal puede estar expuesta.

Para garantizar un óptimo funcionamiento de la cabina insonorizadora, es posible verificar resultados mediante la comparación visual – auditiva del nuevo diseño, objeto del presente proyecto y el utilizado diariamente; donde se puede apreciar una gran diferencia en cuanto al control del ruido mostrando una disminución del mismo exitosamente expuesto en este caso.

El sonido o la propagación del mismo está dado por una relación logarítmica, lo cual demuestra que su reducción no son lineales. Disminuir un decibel es un valor muy grande y aun mas cuando se ha visto que la el oído del hombre percibe 2 puntos en un aumento de 10.

Realizar un manual de ensamble para un tipo de producto que entra en una línea de producción como es la línea de ensamble de máquinas en Eduardoño, es la mejor forma de garantizar seguridad, calidad en el ensamble, productividad ya que no se realizan movimientos innecesarios, entre otros.

La validación de los resultados esperados es la calificación más importante y clara que se le puede dar a un proyecto. Esta validación depende de cómo se haya evaluado las condiciones iniciales para poder tener un referente y poder comparar los resultados contra ese mismo.

Parar alcanzar los criterios de éxito de un proyecto de este tipo, desarrollo de un producto no elaborado en la industria Colombiana, es necesario el apoyo y soporte de la empresa privada, en este caso Eduardoño S.A., que ponga a disposición de la academia los recursos humanos, tecnológicos y de capital para desarrollar productos que hagan el mercado colombiano cada vez más competitivo.

Cuando se quiere dar solución a un problema actual de la industria, se debe tener en cuenta que incluir nuevos elementos al diseño pueden alterar el funcionamiento inicial del equipo. En este caso, la adición de la cabina evidenció restricciones de refrigeración, hizo necesaria la reevaluación estructural del chasis, además de la eficiencia del equipo como tal.

La recolección de información es la base para alcanzar los criterios de éxito en un proyecto, ya que entrega la visibilidad para separar cuales son las causas raíces a eliminar, cuales son las que realmente son representativas y prioritarias, y cuales se hacen fáciles de mitigar con poco esfuerzo.

RECOMENDACIONES

Explorar y estudiar el uso de otros materiales aislantes para la cabina de modo que se pueda obtener una insonorización más eficaz.

Ponerle al equipo el encendido automático para crear mayor hermeticidad, tal manera que el área para prender el generador pueda ser sellado y se le pueda poner material aislante.

Reemplazar el tanque de gasolina, mayor duración y una mayor autonomía. Además, si el tanque de gasolina es más grande permitiría que éste actuara como aislante del sonido también.

Estudiar el cambio del sistema de refrigeración, de este modo se podrían eliminar o reducir dramáticamente las entradas y salidas de aire a la cabina, las cuales son la puerta para el gran parte del sonido se salga. Así, se podría lograr hermeticidad y por lo tanto una mayor reducción del sonido.

Continuar con estudio para una mayor disminución de la potencia sonora, ya que entre más insonorizado se pueda desarrollar el equipo, más competitivo se hará en el mercado.

BIBLIOGRAFIA

CLÁSICA

(ENDRESS, 2000) ENDRESS. Industrial program 2000/2001: Generator, Power Supply Installations, Mobile Floodlight Installations, Engine Pumps, Mobile Heating Systems 2000. Revista ENDRESS.

(BEHAR, 1994) BEHAR, Alberto. "El ruido y su control". México. Trillas. 1994. ISBN 968-24-4727-5.

(ICONTEC, 1993) ICONTEC. Acústica: descripción y medición del ruido ambiental aplicación de los límites de ruido. Santa fe de Bogotá. 1993.

(MUNJAL, 1987) MUNJAL, M. Acoustics Of Ducts And Mufflers: With Application To Exhaust And Ventilation System Design. New York. John Wiley & Sons. 1987. ISBN 0471847380.

(HARRIS , 1991) HARRIS, D. "Noise Control Manual". New york. Van Nostrand Reinhold, 1991. 162P. ISBN 0442008511.

(FOREMAN, 1986) FOREMAN, J. "Sound Analysis and Noise Control". New York. Van Nostrand Reinhold, 1990. 461P. ISBN 0442319495.

(INCROPERA y DEWIT, 1999) INCROPERA, F y DEWITT, DAVID P .
Fundamentos De Transferencia De Calor. 4 ed. Mexico: Prentice Hall, 1999.
886p. (). ISBN 9701701704.

INTERNET

(WESTERBEKE@, 2005) WESTERBEKE, Pagina principal [En línea]. Disponible en internet: <http://www.westerbeke.com>

(GAMMA@, 2005) GAMMA, Pagina principal [En línea]. Disponible en internet: <http://www.gamma.com>

(GENPOWER@, 2005) GENPOWER, Pagina principal [En línea]. Disponible en internet: <http://www.westerbeke.com>

(STOPSON@, 2005) STOPSON, Pagina principal [En línea]. Disponible en internet: <http://www.stopson.com>

(RADIOHACK@, 2005) RADIOHACK, Pagina principal [En línea]. Disponible en internet: <http://www.radioshack.com>

(CALORCOL@, 2007) CALORCOL, Pagina principal [En línea]. Disponible en internet: <http://www.calorcol.com.co>

(CUMMINS@, 2007) CUMMINS, Pagina principal [En línea]. Disponible en internet: <http://www.cummins.com>

(EDUARDONO@, 2008) EDUARDONO S.A. "Página Principal" [En línea]. Disponible en Internet en: <http://www.eduardono.com/eduardono>

(ACUSTICA @, 2008) ACUSTICA. "Control pasivo del ruido". [En línea]. Disponible en Internet en: <http://www.eie.fceia.unr.edu.ar/~acustica/biblio/rusegind.pdf>

(EXPOSICIÓN AL RUIDO@, 2007) "Evaluación de la exposición al ruido". [En línea]. Disponible en Internet en: <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/GuiasMonitor/HigieneIndustrial/VII/Ficheros/ejhi7.pdf>

(YAMAHA@,2008) YAMAHA "YAMAHA Motors". [En línea]. Disponible en Internet en: <http://www.yamahator.co.jp/global/consumer/pp/engine/lineup/mz360/index.html>

(POWER GENERATION@, 2008) POWER GENERATION. "Aplicaciones de disminución de ruido en generadores. [En línea]. Disponible en Internet en: <http://www.yamahaotor.co.jp/global/consumer/pp/engine/lineup/mz360/index.html>

(RUIDO@, 2008). "Teoría y control del ruido". [En línea]. Disponible en Internet en: <http://alejandraen.wordpress.com/2007/11/27/%C2%BFcomo-se-mide-el-nivel-de-ruido/>

(INSONORIZACION@, 2008) "Tipos de insonorización". [En línea]. Disponible en Internet en: <http://es.wikipedia.org/wiki/Insonorizaci%C3%B3n>

ANEXOS

ANEXO A: Ficha técnica del producto acustiplaca.

ANEXO B: Ficha técnica del ventilador y extractor.

ANEXO C: Ficha técnica de la planta YS6000 insonorizada.

ANEXO D: Estándar de materiales a utilizar en el producto.

ANEXO E: Manual de ensamble de planta YS6000 insonorizada.

ANEXO F: Planos de planta YS6000 insonorizada.