

COMPARACIÓN ENTRE LOS MÉTODOS DE CAMPO DIRECTO Y CAMPO REVERBERADO EN PRUEBAS ACÚSTICAS PARA NAVES ESPACIALES.

Helfry Alexander Bethencourt Rosendo
e-mail: helfry@abae.gob.ve

RESUMEN: Se presenta una comparación entre el método tradicional de campo reverberado y el método de campo directo en las pruebas acústicas a naves espaciales, considerando las ventajas y desventajas de cada técnica para el desarrollo de la tecnología espacial en Venezuela en la escogencia de la implementación de un método según las características del proyecto espacial sus condiciones en pro de ahorrar divisas, garantizando el aseguramiento y reduciendo los riesgos del proyecto. Se describen los componentes de ambos procedimientos y se comparan entre sí, en el caso del campo reverberado donde la nave espacial es colocada en una cámara de reverberación cerrada se genera un campo de sonido por medio de la modulación de nitrógeno gaseoso que mediante los ecos reflejados en la cámara y un sistema de control asegura la uniformidad del campo de sonido en toda la prueba alrededor del producto, en el cual se reproducen las condiciones a la que estará sometido el satélite en el momento del lanzamiento y posterior vuelo transónico del vehículo lanzador con el método de campo directo donde el ambiente sónico del lanzamiento es simulado mediante un arreglo de altoparlante electroacústicos y equipos asociados colocados alrededor del producto sin la necesidad de la cámara de reverberación y la modulación del nitrógeno siendo este último de más reciente aplicación en el área espacial.

PALABRAS CLAVE: Campo directo, campo reverberado.

1 INTRODUCCIÓN

Los vehículos lanzadores tienen dos etapas críticas bien identificadas en las que se produce un ambiente especial al cual los satélites y el mismo lanzador deben estar asegurados y certificados de que soportarán dichas condiciones, este es el ambiente acústico, que se genera en la etapa del despegue conocida como "liftoff" en el que el encendido de los motores y rompimiento de la inercia generan una vibración en la escala acústica con gran potencia sónica que es transferida desde la base del cohete por su estructura y el aire a su alrededor al fairing donde se encuentra alojada la carga útil; la consecuente etapa de transferencia del vuelo subsónico al supersónico conocida como transónica.

Este ambiente afecta de manera más intensa a las estructuras muy largas y de poco peso, de esto se desprende que para el aseguramiento del producto del vehículo lanzador y el éxito de la misión, sea necesario

simular en tierra el ambiente acústico. Este ambiente es simulado por medio de métodos que recrean y superan las condiciones reales a las que estarán sometidos los productos en este ambiente el método tradicional de cámara de reverberación con sus equipos asociados y el más reciente el de campo directo.

Se dará una breve explicación de cada método, sus ventajas y desventajas basadas en publicaciones referentes al tema comparaciones, funcionalidad aplicaciones y limitaciones de cada método.

2 AMBIENTE ACÚSTICO.

Es parte del ambiente dinámico, se produce en el vehículo lanzador, por el intercambio de flujo de líquidos en las diferentes tuberías, el cambio de la presión dinámica a causa del sistema de propulsión del vehículo con la atmósfera, esta vibración es transferida a la carga útil por medio del aire cuando este cambia su presión a frecuencias que entran en el rango del sonido.

La ignición del vehículo lanzador crea una excitación acústica por la salida de gases a la atmósfera y en su desplazamiento, que dura entre 3 a 6 segundos este campo de sonido que se refleja en el vehículo induce una vibración, con lo que crea dos etapas significativas de este ambiente el "liftoff" la fig. 1 muestra una ilustración de este efecto.

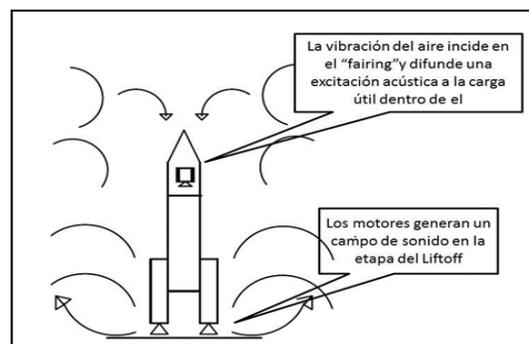


Figura 1 Etapa de liftoff

La otra etapa significativa de este ambiente ocurre en el vuelo en la región transónica, que es el punto donde se pasa del vuelo normal a el vuelo supersónico, en este punto se generan frecuencias con una energía similar a la etapa de "liftoff" estas vibraciones van cambiando con la presión del sonido, que varía en proporción a la velocidad relativa del vehículo en la atmósfera, hasta llegar a la velocidad donde ocurre la región transónica en la fig. 2 se ilustra este efecto.

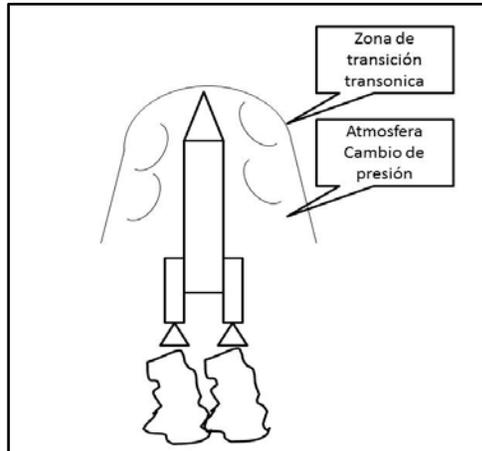


Figura 2 Etapa Transonica

La magnitud de esta excitación acústica depende de unos factores que son: el tamaño de la tobera del motor, la velocidad de salida de los gases, tamaño de la boquilla de entrada de la tobera, localización de las estructuras, configuración de los ductos en el vehículo, incremento de la velocidad del vehículo, velocidad relativa entre el vehículo y la atmosfera, turbulencia creada por el vehículo en la atmosfera, paso del cohete a la región transonica del vuelo, esta excitación es comparable en magnitud a la etapa del "liftoff" [1], [2].

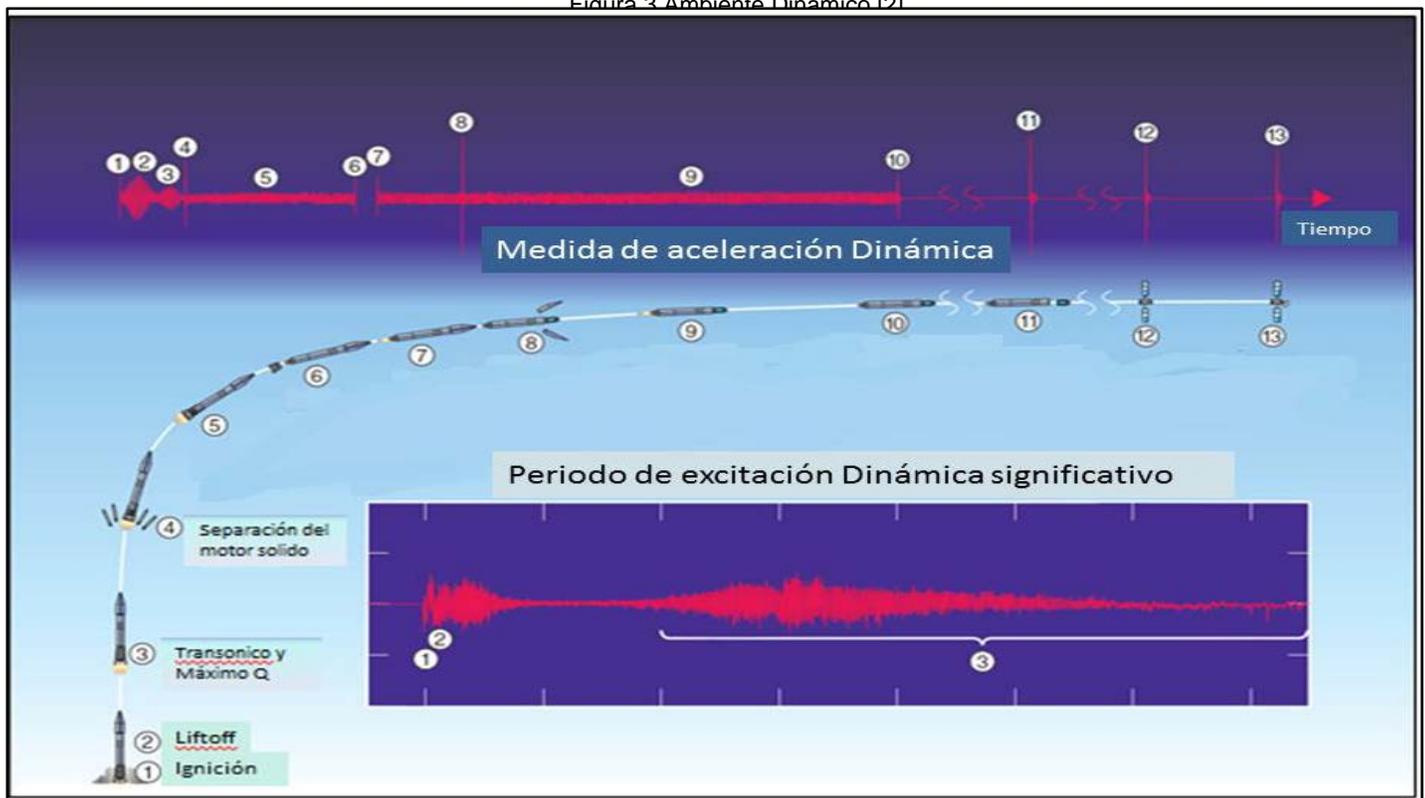
Las partes más vulnerables y a las que se pone más énfasis en el diseño son los componentes de baja masa, como paneles solares, estructuras, instrumentos sensibles como cámaras, antenas, sensores externos e internos de la carga útil y otros.

A lo largo de la historia de los vuelos espaciales y por medio de la recolección de datos se ha podido reconocer el rango de acción del desplazamiento de las frecuencias sónicas a lo largo del liftoff y la región transonica en el vuelo de vectores [2] la fig. 3 ilustra esta medida, conociendo estos datos se aplica métodos estadísticos para unificar el criterio y buscar una relación lineal que permita simular el ambiente dinámico y probar efectivamente con seguridad y una incertidumbre mínima, que los productos superaran sin problemas el vuelo en el ambiente acústico.

Los potenciales problemas que afectan tanto a los vehículos como a la carga útil se listan a continuación [3]:

- Mal funcionamiento de partes mecánicas y electrónicas por la vibración estructural y cargas acústicas internas.
- Fatiga y fractura de componentes internos y de soporte al hardware, como cables e instrumentos montados en bases anti golpes.
- Fatiga de cargas ligeras en el exterior de la estructura como antenas e instrumentos.

Figura 3 Ambiente Dinámico [2]



El ancho de banda en la que se encuentra este ambiente acústico que va típicamente desde 30hz a 10000hz, dividido en $\frac{1}{3}$ de octava [2] con un espectro de presión de sonido en db con referencia a 20 micro páscales [4].

3 MÉTODO DE CAMPO REVERBERADO.

Es el método tradicional, en el cual se usa una cámara de reverberación con un volumen específico para productos de dimensiones especificadas, este método usa además una serie de subsistema para lograr que el campo creado sea lo más uniforme posible sobre el producto y que la energía del campo supere las condiciones de la máxima expectativa de vuelo del satélite en el ambiente acústico fig.4.

En este método se usa nitrógeno gaseoso que es modulado por medio de un sistema electromecánico denominado generador de sonido, que ingresa a la cámara promedio de unas cornetas ecualizadas a bandas de frecuencia específicas, retroalimentadas por un sistema de control, que garantizan la uniformidad del campo de sonido sobre el producto.

3.1 CALIFICACIÓN DEL PRODUCTO.

Para la calificación del producto, en este ambiente, generalmente se realizan 4 pruebas definidas: 3 principales y una para la preparación y calibración de los equipos involucrados, dos principales de bajo nivel y una de alto nivel en la disposición de bajo, alto, bajo con el fin de corroborar que no se encuentren diferencia entre las dos pruebas de bajo nivel, las secundarias son las pruebas que se realizan previo a las principales para asegurar la calibración y el buen funcionamiento de los equipos durante las pruebas, estos test de calificación se conducen a los modelos de ingeniería con un nivel más alto a la máxima expectativa de vuelo y a los modelos de vuelo con niveles muy próximos a la expectativa máxima de vuelo.

3.2 CÁMARA DE REVERBERACIÓN.

Esta cámara está construida, la mayoría de las veces de forma rectangular en concreto, sus dimensiones están calculadas para que resuenen a un rango específico de frecuencias y cuyo volumen deberá ser por lo mínimo 10 veces mayor al volumen del producto a ser probado, consta de una puerta de dimensiones tales que permita el paso de productos del volumen efectivo de la cámara con seguridad, sin comprometer el efecto de reverberación; esta cámara tiene unas cavidades que permite empotrar en ella el sistema de cornetas para la generación del campo sónico y de un túnel anecoico.

3.3 SISTEMA DE GAS.

Es un conjunto de tuberías, válvulas y tanques de almacenamiento regulados por un sistema de control automático, que permite suministrar un flujo constante de nitrógeno gaseoso a los generadores de sonido durante toda la prueba acústica, la mayoría de las veces está compuesto: por tanque de almacenamiento de nitrógeno líquido, tanque de nitrógeno gaseoso, válvulas reguladoras de presión, tuberías, conexiones y computadora de control.

3.4 SISTEMA DE SONIDO.

Este sistema consta regularmente de la parte electrónica del sistema y lo componen, los generadores de sonido estos son electroválvulas de alta velocidad que por medio de una corriente eléctrica modulan el gas que ingresa a la cámara, esta corriente eléctrica es suministrada por amplificadores de sonidos que a su vez amplifican una señal de baja potencia que proviene de la computadora de control donde un software especializado genera la señal de audio con la frecuencia y amplitud especificado para la prueba, que garantiza la uniformidad del campo de sonido en la cámara por medio de un sistema de retroalimentación, que utiliza micrófonos especiales como sensores, la disposición y cantidad de estos es particular según la aplicación de la prueba en la fig.4 se muestra un diagrama de estos sistemas.

3.5 SISTEMA DE MEDICIÓN.

Este sistema es una de las partes más importantes de ambos métodos ya que en la mayoría de los casos son similares o iguales, en el satélite o el producto a ser probado se instalan una serie de sensores, comúnmente acelerómetros, en una disposición dependiente del diseñador que le permite censar, medir y comprobar los datos arrojados de la simulación por computador, demostrando que las condiciones de diseño han sido satisfechas.

Este grupo de acelerómetros y la cantidad de estos depende de las facilidades del sistema electrónico que se encarga de recoger los datos, a mayor cantidad de canales la incertidumbre baja, pero el riego y los costos aumentan al tener que conectar más cables sobre el producto, por eso esta cantidad es una relación del costo beneficio vs. Confiabilidad que depende del fabricante de estos equipos y que definitivamente limita al diseñador.

Este sistema está en la mayoría de los casos compuesto por un computador industrial, un software dedicado, una serie de conversores analógicos digitales, acondicionadores de señal, cables, conexiones y amplias unidades de memoria. En el software se puede programar la recepción de canales la visualización en dominio temporal o frecuencial, graficas individuales parciales o simultáneas, duración de la prueba, tolerancias y márgenes de seguridad para garantizar el producto.

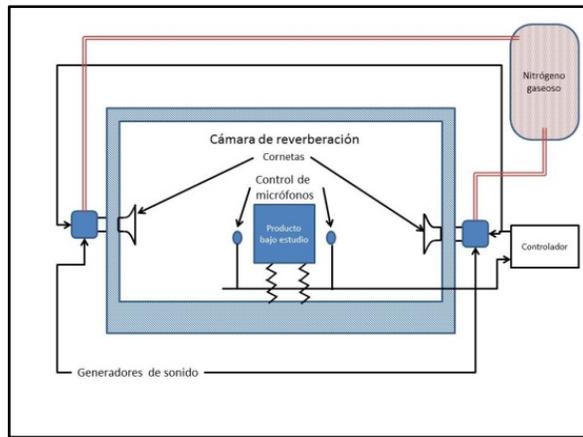


Figura 4 Sistema de un Campo Reverberado

4 MÉTODO DE CAMPO DIRECTO

Este método consiste en generar directamente el Ambiente sónico sobre el producto, modulando el aire circundante al mismo, es decir que se hace una serie de arreglos de transductores alrededor del satélite a distancias específicas con una configuración determinada para lograr un campo sónico uniforme y controlado.

Este nuevo método no usa nitrógeno y tampoco utiliza una cámara de reverberación, para lograr simular el ambiente acústico se utilizan altavoces electroacústicos de diferentes dimensiones, ecualizados en bandas de frecuencia que permiten generar ondas de sonido a presiones y frecuencias distribuidos alrededor del satélite.

El sistema de medición es similar al del método de campo reverberado nombrado en el punto 3.5.

4.1 CALIFICACIÓN DEL PRODUCTO.

Para la calificación del producto en el método de campo directo, se utiliza el mismo criterio que en el campo reverberado nombrado en el punto 3.1.

4.2 SISTEMAS DE ALTAVOCES

Es un arreglo de altavoces por lo general 3 de diferentes tamaños calculados por la banda de frecuencia a reproducir, empotrados en cajas acústicas usualmente de madera o polímero, encargados de transformar la potencia eléctrica en potencia sónica, acomodados en una configuración circular alrededor del producto con una altura igual o superior a la del satélite un ejemplo se muestra en la fig.5 y fig.6.

Estas torres de altavoces, son de uso común es decir comerciales, que cumplen con el funcionamiento básico de un parlante electroacústicos, una bobina dentro de un campo magnético fijo y un cono.

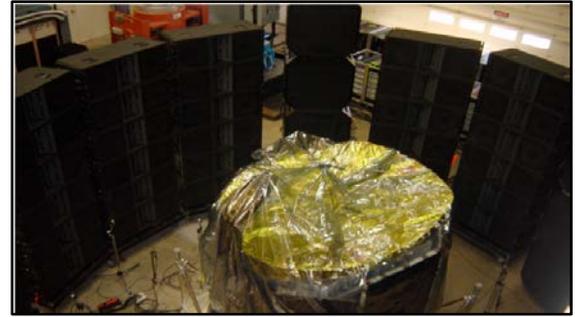


Figura 5 Arreglo de Altavoces [5]

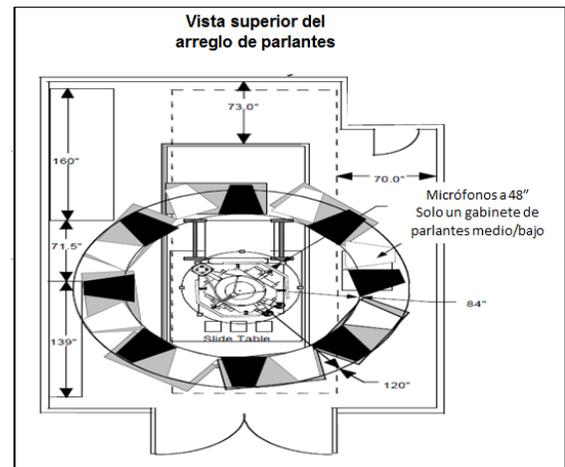


Figura 6 Vista superior del sistema [6]

4.3 SISTEMA DE SONIDO

Este sistema es el encargado de transformar las señales de baja potencia del sistema de control, a una potencia adecuada para manejar los parlantes electroacústicos, en esta técnica se suele dividir la potencia en varios amplificadores que suministran la energía a cada torre de parlantes es decir que cada torre de parlantes tiene sus propios amplificadores, en la composición del sistema se encuentra también el sistema de control que presenta una diferencia con el método de campo reverberado y es que su control es del tipo M.I.M.O (multiple input, multiple output), por sus siglas en inglés o múltiples entradas múltiples salidas [7], un método más complejo que el sistema S.I.S.O de las cámaras de reverberación.

El sistema de control también es tipo realimentado, usa micrófonos para medir el campo y dar una señal de retroalimentación al sistema de control con la particularidad de que el mínimo de micrófonos es de 8 distribuidos alrededor del satélite de forma uniforme, para garantizar la uniformidad del campo de sonido.

4.4 SISTEMA DE MEDICIÓN

El sistema de medición del método de campo directo puede ser similar o igual al que se usa en el campo reverberado y este es nombrado en el punto 3.4.

5 PRUEBA ACÚSTICA EN NAVES ESPACIALES.

5.1 Propósito.

Demostrar la habilidad que tienen grandes superficies, instrumentos y sensores de las naves espaciales para soportar la exposición extrema a las vibraciones producidas por la presión de sonido durante el tiempo de vuelo del vehículo lanzador [4].

La fluctuación de presión asociada con la energía acústica durante el lanzamiento causa la vibración estructural de componentes en una amplia banda de frecuencias que va desde 30Hz a 10000Hz (10KHz), la vibración alta y baja de estas bandas de frecuencia causa una rápida fatiga estructural, por esto el diseño debe ser capaz de soportar estas exigencia con un amplio margen que garantice soportaran el lanzamiento, más en estructuras de gran superficie y poca masa como paneles solares, sensores y otros.

La definición de un método de prueba agresivo está destinada a mitigar el efecto del medio ambiente acústico en el lanzamiento otorgándole fiabilidad a la carga útil, dentro de los criterios de masificación de beneficios en relación al peso, garantía, funcionalidad en proporción del riesgo versus el costo [8].

5.2 Implementación metodológica.

Los modos de falla producidos por la excitación acústica son similares a los asociados a los tipos de fatiga estructural vibratoria, es decir fatiga por el desplazamiento excesivo, fatiga por desgaste, fatiga por doblado.

Los datos del campo de sonido producido en el lanzador se usan para definir el campo de acción de las bandas de frecuencias presentes en este ambiente, que cambian con respecto al lanzador, la presión sonora que estos generan afectan la estructura, esta frecuencia se mide en Hertz y la presión sónica está definida en Decibelios con un una referencia de 2×10^{-5} Pa por medio de la relación:

$$db = 20 \log \left(\frac{Presion}{Presion\ de\ referencia} \right)$$

La unidad logarítmica es el decibelio, estas bandas son divididas en $\frac{1}{3}$ de octava con relación a su frecuencia central para lograr un barrido eficiente, la Tabla 1 muestra el estándar más utilizado por la mayoría de las agencias espaciales en el mundo.

Frecuencia central Hz	Nivel de Presión de sonido dB (SPL)
31.5	122.0
40.0	124.0
50.0	126.0
63.0	127.5
80.0	129.5
100.0	130.5
125.0	132.0
160.0	133.0
200.0	133.5
250.0	134.0
315.0	134.5
400.0	134.5
500.0	134.0
630.0	133.5
800.0	133.0
1000.0	132.0
1250.0	131.5
1600.0	130.0
2000.0	129.0
2500.0	128.0
3150.0	126.5
4000.0	125.0
5000.0	124.0
6300.0	122.5
8000.0	121.0
10000.0	120.0

Tabla 1 Estándar frecuencia & presión en 1/3 de octava [8].

5.3 DESCRIPCIÓN DEL TEST DE MÉTODO DE CAMPO REVERBERADO.

La unidad bajo prueba es instalada en el centro de la cámara de reverberación, esta debe ser por lo mínimo 10 veces mayor en volumen al producto bajo prueba, se conectan los sensores del sistema de control el mínimo número de micrófono es de 4 y estos deben estar separados del satélite a una distancia de 0.5 metros [4], los acelerómetros del sistema de medición se conectan al acondicionador de señales del sistema. Después de los test secundarios de calibración y pruebas del sistema, se conducen las pruebas al satélite, las dos de bajo nivel y la de alto nivel, luego se comparan los resultados y se realiza el reporte correspondiente, con el cual se verifica que no existan daños, calificando el producto ya sea el modelo de ingeniería o el modelo de vuelo.

5.4 DESCRIPCIÓN DEL TEST DE MÉTODO DE CAMPO DIRECTO.

Este método se implementa colocando alrededor del producto una serie de gabinetes con varios parlantes electroacústicos, separados del centro del satélite a una distancia de 2.1metros (84 pulgadas) fig.6, capases de producir el promedio de presión de sonido especificado que puede ser mayor o igual a 135db,con una altura

igual o superior a la del satélite, 8 sensores del sistema de control como mínimo, que a diferencia del otro método este utiliza un sistema de control MIMO donde cada señal de los sensores es procesada separadamente, generando múltiples salidas de control que distribuyen la potencia a los amplificadores alrededor de los parlantes, controlando las variaciones espaciales del campo alrededor del satélite [6], los acelerómetros son conectado al sistema de medición del mismo modo que en sistema de campo reverberado, luego de la instalación de los equipos y preparación de la prueba se sigue el procedimiento para calificar el producto como se nombra en el punto 3.1.

6 VENTAJAS Y DESVENTAJAS.

6.1 MÉTODO DE CAMPO REVERBERADO.

Ventajas:

- Es un método probado y estandarizado que goza de popularidad entre las agencias espaciales.
- Es confiable y de bajo riesgo.
- Los niveles de incertidumbre son bajos.
- La potencia de la presión sónica no es un problema.
- El sistema de control retroalimentado es simple y confiable.

Desventajas:

- El tamaño y el volumen de la cámara limitan el volumen de la carga útil a ser probada.
- El costo de conducir estas pruebas es bastante alto.
- Los equipos e instalaciones son costosas en su implementación y mantenimiento.
- Las instalaciones de alta presión implican cierto riesgo industrial.

6.2 Método de campo directo:

Ventajas:

- Sus costos de implementación son muchos más económicos que los del método de campo reverberado por ser equipos comerciales usados en otras aplicaciones.
- No se usa nitrógeno en el proceso de simulación por lo que los costos de operación se reducen.
- La movilidad de los equipos permiten bajar el riesgo que representa mover la unidad bajo prueba, ya que los arreglos se realizan alrededor del producto.

Desventajas:

- El método no está estandarizado y sigue en etapa experimental.
- No se encuentran muchas aplicaciones para aumentar su confiabilidad.
- El sistema de control es más complejo que el del método de campo reverberado.

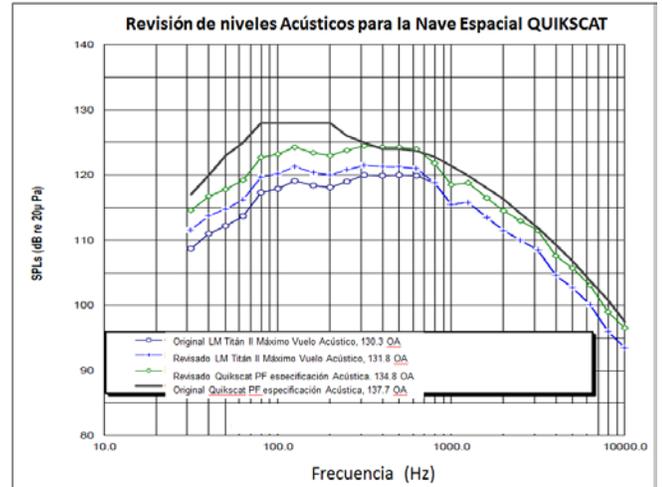


Figura 7 Nivel Acústico del QuikSCAT [6]

7 COMPARACIÓN DEL MÉTODO DE CAMPO DIRECTO.

La Administración espacial de Estados Unidos (NASA) en 1998 realizó la prueba acústica con el método de campo directo a un satélite de percepción remota llamado QuikSCAT, en el Laboratorio de Propulsión a Chorro (Jet Propulsion Laboratory) en la fig.8 se muestran los valores estimados y aplicados al producto con las máscaras del lanzador, la NASA optó por este método dada la exigencia del cliente de no retrasar la fecha de lanzamiento a pesar del retraso en el cronograma de pruebas, con este método lograron terminar la nave sin problemas por la rapidez de su implementación los cuales reportaron en sus resultados un éxito [6].

El Laboratorio de propulsión a Chorro (Jet Propulsion Laboratory) realizó en el 2007 unos test en la que se sometieron varios equipos y un modelo de prueba a ambos métodos para comprobar la efectividad del método de campo directo cuyas conclusiones fueron [5]:

- Las pruebas de ambos métodos resultaron similares para los sensores del CloudSat.
- Ningún método resultó dominante la diferencia de las respuestas, se debió a la configuración y orientación del panel de prueba.

En la fig.9 se muestra un gráfico de frecuencia & presión comparativo de los promedios de las señales producidas por ambos métodos sobre el mismo producto.

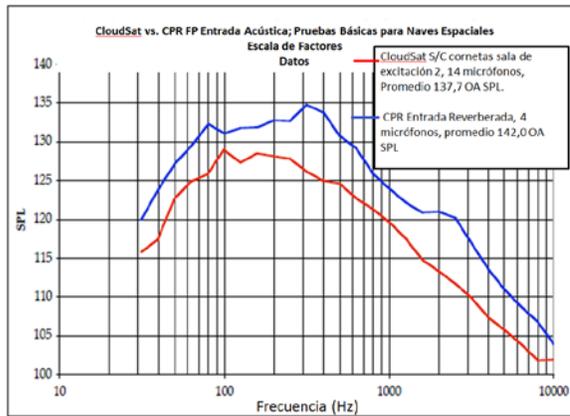


Figura 8 Comparación promedio de las señales [5]

La universidad Johns Hopkins también realizó unas pruebas comparativas entre ambos métodos en su laboratorio de física aplicada, en el cual sometieron, una maqueta de un satélite y otros equipos y estos son algunos de sus resultados [9]:

- El método de campo directo se comporta similar al de campo reverberado.
- El sistema de control se mantuvo entre los márgenes de tolerancia fácilmente.
- En el método de campo directo fue más difícil obtener las frecuencias intermedias de 100Hz a 500Hz y el método de campo reverberado fue más difícil obtener las frecuencias por debajo de lo 80Hz y mayores a 800Hz.

En la fig. 10 se muestra las gráficas de promedio de presión de sonido estimada, obtenida y tolerancias para ambos métodos sobre el mismo producto.

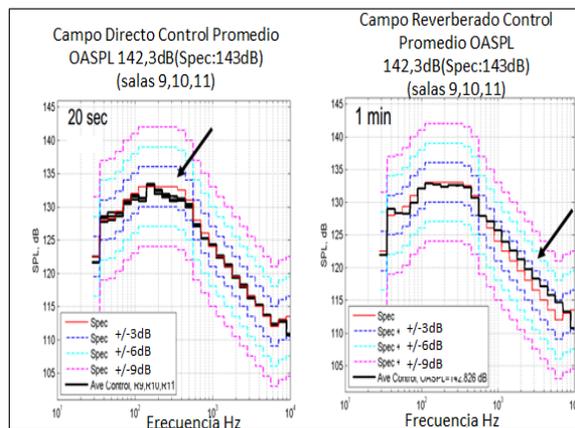


Figura 9 Promedio de presión de sonido de ambos métodos [9]

8 CONCLUSIONES

- Para el empuje de la tecnología espacial en Venezuela se propone la investigación en el

país del método de campo directo aprovechando las capacidades instaladas en la Agencia Bolivariana para actividades Espaciales, ya que la tendencia será migrar a este método por su rapidez de implementación y bajos costos.

- El método de campo reverberado es el método más usado y el de mayor confianza en las agencias espaciales por su confiabilidad en contraparte del otro método que no existe un estándar que permita igualar esa confianza ya que mucho de los resultados dependen de la ubicación de los equipos y del sistema de control.
- Si se desea incursionar en el desarrollo de los nanos satélites, el método más recomendado es el de campo directo, ya que sus capacidades son adaptables, para la calificación de este tipo de naves sin implicar altos presupuestos que se gastarían si se usa el método tradicional de campo reverberado.

9 REFERENCIAS:

- [1] Chince Academy of space Technology, Satellite Dynamic Environment Test Technologies, Beijing: CASC.
- [2] Crosslink, 2005. [En línea]. Available: http://www.space-library.com/Crosslink_V6N2_Fall2005.pdf.
- [3] National Aeronautics and Space Administration, «Acoustic Loads Generated by the Propulsion System,» Junio 1971. [En línea]. Available: <http://www.everyspec.com>.
- [4] Department of Defense EEUU, *Military Standard*, 1994.
- [5] Jet Propulsion Laboratory, *Direct Field and Reverberant Chamber Acoustic Test Comparisons*, California, 2007.
- [6] National Aeronautics and Space Administration, *SPACECRAFT DYNAMIC ENVIRONMENTS TESTING*, Washington, 2013.
- [7] SandV, «Sandv,» 08 2011. [En línea]. Available: <http://www.SandV.com>. [Último acceso: 15 08 2014].
- [8] W. Harkins, «nasa.gov,» Febrero 1999. [En línea]. Available: <http://www.nasa.gov/office/oc/e/llis/0787.html>. [Último acceso: 19 Agosto 2014].
- [9] Johns Hopkins University, «msi-dfat,» 11 ENERO 2012. [En línea]. Available: http://msi-dfat.com/wp-content/uploads/2012/01/11_2009_SCLV_workshop_GLM.pdf. [Último acceso: 20 Agosto 2014].
- [10] National Aeronautics and Space Administration, 20 Enero 20011. [En línea]. Available: <https://standards.nasa.gov/documents/detail/3314909>.