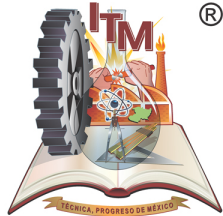


SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE MORELIA
"José María Morelos y Pavón"

DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

TESIS

**"SISTEMA DE DETECCIÓN MÍNIMO DE
FALLAS PARA SISTEMAS DE AUDIO
DOLBY 5.1 EMPLEANDO TRANSFORMADA
RÁPIDA DE FOURIER "**

**CASO DE ESTUDIO UTILIZANDO DSKTMS6713 EN SALA
DE PRUEBAS CINEMATOGRAFICA**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO EN ELECTRÓNICA

PRESENTA:
IVÁN LUNA SÁNCHEZ

DIRECTOR: GERARDO MARX CHÁVEZ CAMPOS
CODIRECTOR: ADRIANA DEL CARMEN TÉLLEZ
ANGUIANO

REVISOR: ARTURO MÉNDEZ PATIÑO
REVISOR: ALAÍN MANZO MARTÍNEZ

MORELIA, MICHOACÁN, MÉXICO – ABRIL 2016

Iván Luna Sánchez : *Sistema de Detección Mínimo de Fallas para Sistemas de Audio Dolby 5.1 Empleando Transformada Rápida de Fourier, Caso de Estudio Utilizando DSKTMS6713 en Sala de Pruebas Cinematográfica , © Abril 2016*

SUPERVISORS:

Gerardo Marx Chávez Campos
Adriana del Carmen Téllez Anguiano
Arturo Méndez Patiño
Alaín Manzo Martínez

LOCATION:

Morelia, Michoacán, México

TIME FRAME:

Abril 2016

ERRATA

Iván Luna Sánchez : *Sistema de Detección Mínimo de Fallas para Sistemas de Audio Dolby 5.1 Empleando Transformada Rápida de Fourier*, Caso de Estudio Utilizando DSKTMS6713 en Sala de Pruebas Cinematográfica , Vol. I, Abril 2016, Morelia, Michoacán, México.

Página	Línea	En lugar de	Leer
82	4	publicación	presentación

Ohana significa familia.
Y tu familia nunca te abandona ni te olvida.
— Lilo & Stitch

Dedicado en memoria de Georg Simon Ohm.
1789–1854

RESUMEN

Breve resumen del contenido de la tesis...

PUBLICAICONES

Algunas de las ideas y figuras han aparecido previamente en las siguientes publicaciones:

Agregar las publicaciones que se han realizado con la información de esta tesis aquí. Los paquetes `multibib` o `bibtopic`, pueden ser usados para manejar múltiples bibliografías, o para documentos escritos en colaboración de otros autores.

*We have seen that computer programming is an art,
because it applies accumulated knowledge to the world,
because it requires skill and ingenuity, and especially
because it produces objects of beauty.*

AGRADECIMIENTOS

¡Muchas gracias a todos los alumnos que han apoyado con el desarrollo de este formato de tesis, dando retroalimentación para mejorarlo!

En lo que concierne a la primera aproximación a \LaTeX , un especial agradecimiento a la Ph. D. Aydeé Sánchez Santana. Al consejo de posgrado de ingeniería electrónica y al grupo de investigación de *Hypothalamus*¹, por permitir el uso de éstas herramientas para una producción científica de calidad.

Respecto al formato "*Classic Thesis*", un agradecimiento por permitir el uso de la plantilla a *\LaTeX Templates*, en especial a André Miede por la plantilla original.

¹ *Hypothalamus* es una plataforma de colaboración del Instituto Tecnológico de Morelia, para más información visite <http://hypothalamus.itmorelia.edu.mx>

ÍNDICE GENERAL

i	ESTADO DE LA TÉCNICA	5
1	INTRODUCCIÓN	7
1.1	Semblanza del problema	7
1.2	Solución propuesta	22
1.3	Objetivos	23
1.3.1	Objetivo general	23
1.3.2	Objetivos particulares	23
1.4	Hipótesis	24
1.5	Metodología	24
ii	THE SHOWCASE	37
2	MARCO TEÓRICO	39
2.1	Fallas, detección y diagnóstico	39
2.1.1	Métodos basados en el diagnóstico de señales	42
2.2	Diagnóstico basado en procesamiento de señales	43
2.3	Formalización del problema de detección con características no- minales	43
2.4	Procesamiento Digital de Señales	45
2.4.1	Procesamiento de señales no paramétricas	46
2.4.2	Procesamiento de señales basado en modelos	47
2.4.3	Procesamiento de señales basado en estadística bayesiana	47
2.4.4	Procesamiento en base a redes neuronales	48
2.5	Muestreo y Conversión Análogo a Digital	48
2.6	Potencia espectral y su correlación	49
2.7	Métodos basados en análisis de Fourier.	51
2.8	Transformada Discreta de Fourier (DFT)	52
2.9	Transformada Rápida de Fourier (FFT)	53
2.9.1	Desarrollo de algoritmo para FFT con radix-2	53
2.9.2	Algoritmo de separación en frecuencia para FFT con base 2	54
2.10	Fundamentos de sonido	57
2.10.1	La física del sonido	57
2.10.2	Longitud de onda	59
2.10.3	Señales periódicas y no periódicas	59
2.10.4	Espectro audible	60
2.10.5	Nivel de presión sonora y sonoridad	62

2.10.6 El decibel	62
2.10.7 Ruido blanco	64

BIBLIOGRAFÍA	65
--------------	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Mapa mundial de la producción de películas en 2011[1].	8
Figura 2	Asistencia al cine de los 10 países que mas asistentes presentan de los años de 2005 a 2011 en millones de asistentes.	9
Figura 3	Sistema de proyección de 35mm.	11
Figura 4	Sistema de sonido digital 5.1 en una sala cinematográfica, con todos los canales que integran éste sistema.	12
Figura 5	Dispositivo de micro espejos (DMD)[2].	13
Figura 6	Proyectores digitales cinematográficos.	14
Figura 7	Servidores cinematográficos comerciales.	15
Figura 8	Arquitectura de un TMS cinematográfico.	16
Figura 9	Arquitectura de un NOC cinematográfico.	17
Figura 10	NOC de los fabricantes de proyectores lideres a nivel mundial Christie y Barco.	18
Figura 11	Metodología empleada para obtener modelo ideal de la sala de cine.	25
Figura 12	Posición de los micrófonos en el modelado de una sala cinematográfica.	26
Figura 13	Inducción de fallas por canal.	27
Figura 14	Modelado ideal del canal sl.	29
Figura 15	Modelado ideal del canal sr.	30
Figura 16	Inducción de fallas en bocinas 1 y 2 canal Sl.	31
Figura 17	Inducción de fallas en bocinas 3 y 4 canal Sl.	32
Figura 18	Inducción de fallas en bocinas 1 y 2 canal Sr.	34
Figura 19	Inducción de fallas canal sr.	35
Figura 20	Modelado ideal del canal sw.	36
Figura 21	Procedimiento de diagnóstico a partir de mediciones del proceso. a) Con modelo matemático. b) con modelo de señales para n , escenarios o clases de fallas considerando cl características y una matriz de datos históricos y [3].	40
Figura 22	Principio de extracción y evaluación de características de señales.	46
Figura 23	Una señal discreta y su envolvente con variaciones en el tiempo[4].	49
Figura 24	Configuración de un sistema de Procesamiento Digital de Señales[4].	49

Figura 25	La distribución de potencia en frecuencia indica la correlación o el carácter aleatorio de una señal. a) Una señal predecible. b) Una señal aleatoria.[4]	50
Figura 26	Periodicidad y simetría de las constantes de giro o Factores W . [5]	55
Figura 27	Descomposición de una DFT de N puntos en 2 DFT de $N/2$ puntos, para una $N=8$. [5]	57
Figura 28	Gráfica del flujo de una FFT de 8 puntos usando DIF. [5] . .	57
Figura 29	a) Presión ejercida por las moléculas de gas al chocar con la pared. b) La velocidad de las moléculas es más rápido al rebotar si la pared se mueve en su contra. c) La velocidad del rebote de las partículas disminuye si la pared se desplaza en el sentido de la trayectoria del gas. [6]	58
Figura 30	Longitud de onda (wavelength) de una señal periódica senoidal [6].	60
Figura 31	Señales periódicas y no periódicas. [6].	61
Figura 32	Curvas isofónicas de la percepción acústica. [6].	63
Figura 33	Gráfica espectral del ruido blanco.	64

ÍNDICE DE TABLAS

CÓDIGOS

ACRÓNIMOS

- DRY Don't Repeat Yourself
- API Application Programming Interface
- UML Unified Modeling Language

PREFACIO

El presente documento es la primera versión de un manual para la estructura de documentos como tesis, tesinas, reportes técnicos y protocolos de investigación. Se muestran e identifican los elementos y tipografía basados en el ISO-7144 y la guía del Tecnológico Nacional de México y su implementación en \LaTeX . Poniendo a la disposición de estudiantes, de cualquier nivel, una plantilla de fácil uso y adaptación, que a la vez funciona como una guía para que el lector pueda crear sus propias plantillas con un toque personalizado.

La plantilla está configurada para ejecutarse con MiKTeX o \TeX Live , ambos son distribuciones de libres. Además, la el manual tiene tres metas particulares:

1. Proveer un estilo clásico de tipografía en alta calidad, basada en la plantilla "Classic Thesis Template" del autor
2. Crear una guía de ayuda para la elaboración de documentos científicos como tesis, tesinas, libros, reportes técnicos y protocolos de investigación de alta calidad.

La forma en la que se encuentra estructurado el documento, permite que cualquier usuario, con nociones básicas de \LaTeX pueda adaptarlo a sus propias necesidades.

En la primera parte se encuentra la motivación por parte del autor para generar este documento, así como las principales ventajas del uso de \LaTeX . Además se exponen los orígenes de programas de cómputo científico para la generación de documentos técnico-científicos y su incorporación en las universidades.

Todo el documento y los estilos utilizados están liberados bajo licencia GNU, General Public License.

NOTAS IMPORTANTES: El aspecto visual de este documento parecerá un poco inusual a primera instancia. Sin embargo, todo está echo a propósito, especialmente las siguientes:

- No se usan fuentes en negritas. Los tipo *Italic* o pequeñas mayúsculas espaciadas son mejores.
- El tamaño del texto del cuerpo permite una mejor legibilidad y racional la cantidad de información que debe contener una página.

- Los cuadros y tablas se diseñaron para que no usen reglas dobles o verticales.
- La tabla de contenidos permite al lector una forma fácil conocer el número de página sin tener que seguir una línea de puntos

Por lo tanto, procura no modificar el estilo del documento, explore y explote las ventajas que esta guía proporciona, cuando se tenga una mayor experiencia y se conozca que aspecto se quiere, se puede modificar, mientras tanto deje el documento como está.

PRÓLOGO

Un factor importante para la redacción de un documento científico, es la organización. El presente documento sugiere la siguiente estructura:

- `Chapters/` ésta carpeta contiene los archivos individuales como `Chapter01.tex`.
- `FrontBackMatter/`: ésta carpeta contiene, lo que en el estándar ISO-7144 denomina “Front matter” y “Back matter” en donde se encuentran los archivos que contienen la portada, reconocimientos, dedicación, entre otros.
- `gfx/`: contiene las imágenes y gráficas de la tesis. Para organizar aun más la información se pueden crear subcarpetas para los capítulos o tipo de gráficas.
- `Bibliography/`: La administración de la información y documentos a los que se hace referencia es aun más importante. Para ello se recomienda que la carpeta que contenga toda esta información y además el archivo `Bibliography.bib`, que es una base de datos en BibTeX que organiza todas las referencias que posiblemente se citen.
- `classicthesis.sty`: El archivo contiene la definición de estilos para que de la apariencia que tiene el documento. Además funciona con LaTeX, PDFLaTeX... and LyX.
- `ClassicThesis.tcp`: es el archivo de proyecto para T_EXnicCenter. Una reciente herramienta para trabajar con LaTeX, gratuita.
- `ClassicThesis.tex`: es el archivo principal de la tesis donde todo el contenido es integrado y organizado.
- `classicthesis-config.tex`: documento central que integra los paquetes e información del documento que será usado. En el mismo se puede activar lo que se conoce como “backrefs” con el objetivo de obtener información respecto a la bibliografía, acerca de donde fue citada alguna fuente dentro del texto (i. e., número de página).
- *Cambios y ajustes aquí.* Las opciones y modificaciones que se quieran hacer deben cargarse en `classicthesis.sty` with. Los ajustes del título de la tesis, nombre del proponente e información similar. Para esto véase ?? para más información.

Por supuesto hay que iniciar la lectura, estructura y redacción de la tesis con tiempo.

Parte I

ESTADO DE LA TÉCNICA

Illo principalmente su nos. Non message *occidental* angloromanic da. Debitas effortio simplificate sia se, auxiliar summarios da que, se avantiare publicationes via. Pan in terra summarios, capital interlingua se que. Al via multo esser specimen, campo responder que da. Le usate medical addresses pro, europa origine sanctificate nos se nada.

INTRODUCCIÓN

1.1 SEMBLANZA DEL PROBLEMA

El cine es una de las industrias que desde sus inicios generó un amplio mercado de consumidores, mismo que ha logrado conservar e incrementar a través de los años, gracias a la innovación constante, su tenacidad, su evolución tecnológica, y a su amplio dinamismo que le ha permitido adaptarse a los cambios generacionales. Por su naturaleza evolutiva, la industria cinematográfica se ha segmentado en tres grandes bloques que han ido conformando su estructura; la producción, la distribución y la exhibición. La producción a nivel mundial de películas demuestra la bonanza de esta industria. De acuerdo a la UNESCO (*United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*, Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura), el país que más películas produjo en el año 2011, fue la India, con 1,255 filmes, seguido por Nigeria¹ con 997, en tercero se encuentra Estados Unidos con 819, en cuarto lugar está China con 584 películas producidas y en quinto Japón con 441[1]. La Figura 1, muestra el panorama a nivel mundial de la producción cinematográfica en el año 2011; se sombrea cada país por número de largometrajes producidas.

La cantidad de películas producidas a nivel mundial es un reflejo de las percepciones que se adquieren en todas las áreas de la industria, los productores y distribuidores son la base donde se cimienta esta industria. Las grandes productoras estadounidenses marcan el rumbo del cine y su exhibición, así como las percepciones. Por ejemplo, los laboratorios *Dreamworks animation*, reportaron ingresos por USD\$1,316 millones [12], tan solo en el año de 2004.

A este negocio se suman las empresas encargadas de proveer la tecnología necesaria para la elaboración y exhibición de las películas, empleando a un gran número de especialistas y generando derramas económicas importantes. Empresas como la internacional canadiense *IMAX*, reportan activos tan solo en el año de 2014, por USD\$621 millones [13]. La fabricante de proyectores belga, *Barco*, en el año de 2014, reporto ventas por €1,051 millones de euros. [14].

El eslabón final que compone a esta prospera y lucrativa industria, es la exhibición. Es notorio el incremento anual de la infraestructura para la exhibición del cine. El principal mercado para la exhibición de películas a nivel mundial es

¹ Aunque mucho estudios no consideran estas producciones por no ser películas de calidad profesional.

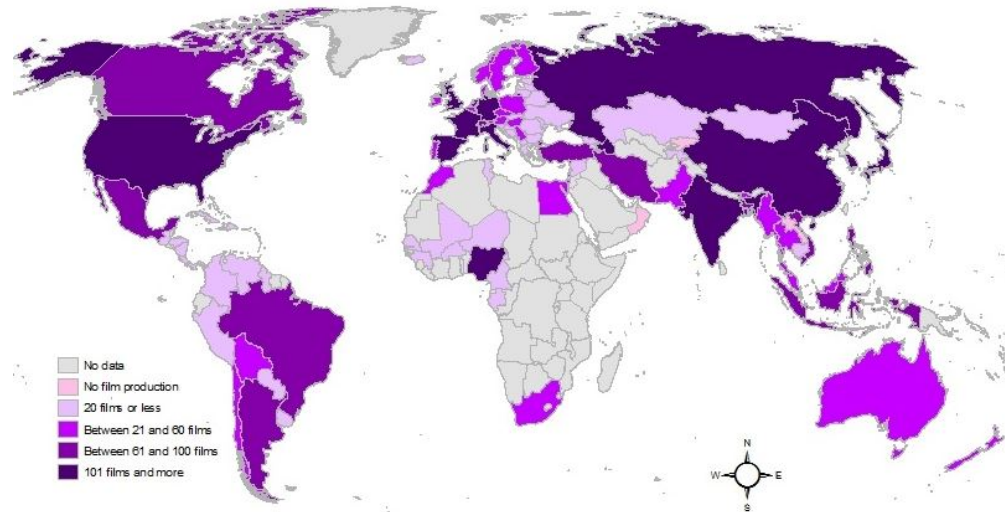


Figura 1: Mapa mundial de la producción de películas en 2011[1].

Estados Unidos. De acuerdo con la UNESCO, en el 2011 este país contaba con 39,641 salas cinematográficas, siendo el número uno en el ramo, seguido por China con 9,286 salas. En tercer lugar, se encuentra Francia con 5,465. En cuarto, México, con 5,166 salas, y en quinto Alemania con 4,640 salas[1].

La infraestructura permite la asistencia de las audiencias a las salas, y la tendencia anual ha sido el incremento del número de salas por país[1], lo que ha traído por consecuencia, que también los asistentes tiendan a incrementar año con año. Aunque también se encuentran fenómenos de volatilidad en esta estadística dependiendo del país, provocando incrementos y decrementos entre años consecutivos. La Figura 2, muestra la tabla de asistentes del año 2005 a 2011, de los 10 primeros países en asistencia a nivel mundial en millones de asistentes.

En el 2012, los ingresos por taquilla al cine a nivel mundial, rebasaron los USD\$33,000 millones [15][16], y a estas cifras falta sumarle lo recaudado en dulcerías, que en realidad es el negocio de los exhibidores de cine[17][18]. El principal país a nivel mundial en asistencia al cine es La India. En el año 2012, este país registra 2,724 millones de boletos vendidos; le sigue Estados Unidos con 1,258 millones de boletos vendidos en 2012; China con 470 millones de boletos, la tercera posición; en cuarto lugar se encuentra México, reportando 229 millones de boletos vendidos; y en quinto Francia con 204 millones de asistentes al cine[19][20][21].

En México, en el año de 2012, se captaron ingresos por taquilla cercanos a los MXN\$10 mil millones [15][17], representando estos el 2.4 % de los ingresos

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	Variación
India	3.770	3.997	3.290	3.251	2.917	2.706	2.940	-22,02%
EE. UU.	1.403	1.449	1.399	1.341	1.415	1.342	1.284	-8,49%
China	157	176	196	210	264	290	370	135,37%
Francia	176	189	178	190	201	207	217	23,42%
México	154	154	175	182	178	190	205	33,06%
Reino Unido	165	157	162	164	173	169	172	4,19%
Japón	160	165	163	160	169	174	145	-9,80%
República de Corea	146	153	159	151	157	149	160	9,75%
Federación Rusa	84	92	105	118	132	156	153	82,54%
Brasil	84	90	89	89	113	135	144	71,50%
Total de los top 10 países	6.298	6.622	5.917	5.857	5.720	5.518	5.788	-8,10%
Mundo	7.372	7.761	7.073	7.033	6.961	6.664	6.984	-5,26%
Porcentaje de los top 10 países	85	85,33	83,66	83,28	82,16	82,16	82,80	Promedio: 83,65

Fuente: Instituto de Estadística de la UNESCO, julio de 2013.

Figura 2: Asistencia al cine de los 10 países que mas asistentes presentan de los años de 2005 a 2011 en millones de asistentes.

a nivel mundial en taquillas, teniendo como mayor recaudadora a la empresa Cinépolis con el 1,5 %; el 62,5 % nacional.

La producción, infraestructura y asistencia a los complejos cinematográficos, brindan idea de la dimensión y tamaño de esta industria a nivel mundial. Ante el tamaño e importancia, se resalta la necesidad de mantener altos estándares de calidad que permitan a las compañías conservar e incrementar la afluencia a sus complejos.

Como ya se ha mencionado, la industria de exhibición cinematográfica ha experimentado cambios radicales en su estructura y funcionamiento, gran parte buscando incrementar la calidad tanto en la proyección como en el sonido. Los avances tecnológicos han transformado el cine tanto en su elaboración, distribución y exhibición. Hasta hace unos pocos años, la grabación y exhibición del cine se realizaba de manera análoga. La imagen y sonido eran grabadas en una cinta plástica en movimiento que sincronizaban cada uno de los fotogramas con el sonido con cámaras y equipo especializado, generando un *master* de varios cientos de metros de longitud, de acuerdo a la duración del filme[22]. Posteriormente se elaboraban copias que eran distribuidas a cada una de las salas cinematográficas donde fueran a ser proyectadas. Los formatos de la cinta fueron cambiando de acuerdo al tamaño y de acuerdo a la época, predominan-

do al final el formato de 35mm², que indicaba la longitud de un fotograma de película.

La proyección se realizaba de manera inversa que la grabación, se hacía circular la copia a través de un haz de luz que se proyectaba en una pantalla, y al mismo tiempo se iba leyendo y decodificando el sonido para reproducirse en sincronía con el vídeo[23]. La Figura 3 muestra un sistema de proyección analógico en cine, en la Figura 3a se muestra un proyector de 35mm de marca Strong, en la Figura 3b es mostrado un grupo de sistemas de platos de la marca Christie en operación.

2 Varios fueron los formatos empleados en cinta de celuloide; 8mm,16mm, 35mm y 70mm, fueron los más populares. Todos estos formatos hacían énfasis en el tamaño de la imagen impresa en la cinta. Al final de la era analógica, los formatos de 35mm y 70mm son los que prevalecieron comercialmente.



(a) Consola de proyección 35mm de marca Christie.



(b) Sistemas de platos para arrastre de película de 35mm, marca Christie.

Figura 3: Sistema de proyección de 35mm.

Los avances tecnológicos y el desarrollo de la era digital, permitió al sonido tomar delantera sobre la proyección en los inicios de la década de los 90 [24][7], incorporando sistemas digitales para la grabación en cinta y lectura en salas, destacándose las empresas Dolby, DTS y Sony en este ramo, cada una desarrollando su propio sistema de sonido digital. Estos formatos digitales permitieron el grabar, mezclar y reproducir las películas en un formato 5.1 natural, sin emu-

laciones como se hacía hasta ese momento[24]. A pesar de que eran 6 canales de audio, se denomina sistema 5.1 porque se cuenta con 3 canales frontales (detrás de la pantalla), 2 laterales que rodeaban a la audiencia (surrround izquierdo y surrround derecho) y un canal de subwoofer, que al sólo reproducir aproximadamente un décimo del espectro audible, no se le considera un canal completo, asignándosele la nomenclatura de “.1” [7][23]. Durante más de una década, se tuvo una exhibición cinematográfica con mejor calidad de sonido que de imagen, con un esquema como el que se muestra en la Figura 4, que muestra los 3 canales frontales detrás de la pantalla, los dos laterales y el subwoofer, además de un procesador de audio cinematográfico de la marca *Dolby*, modelo CP650.

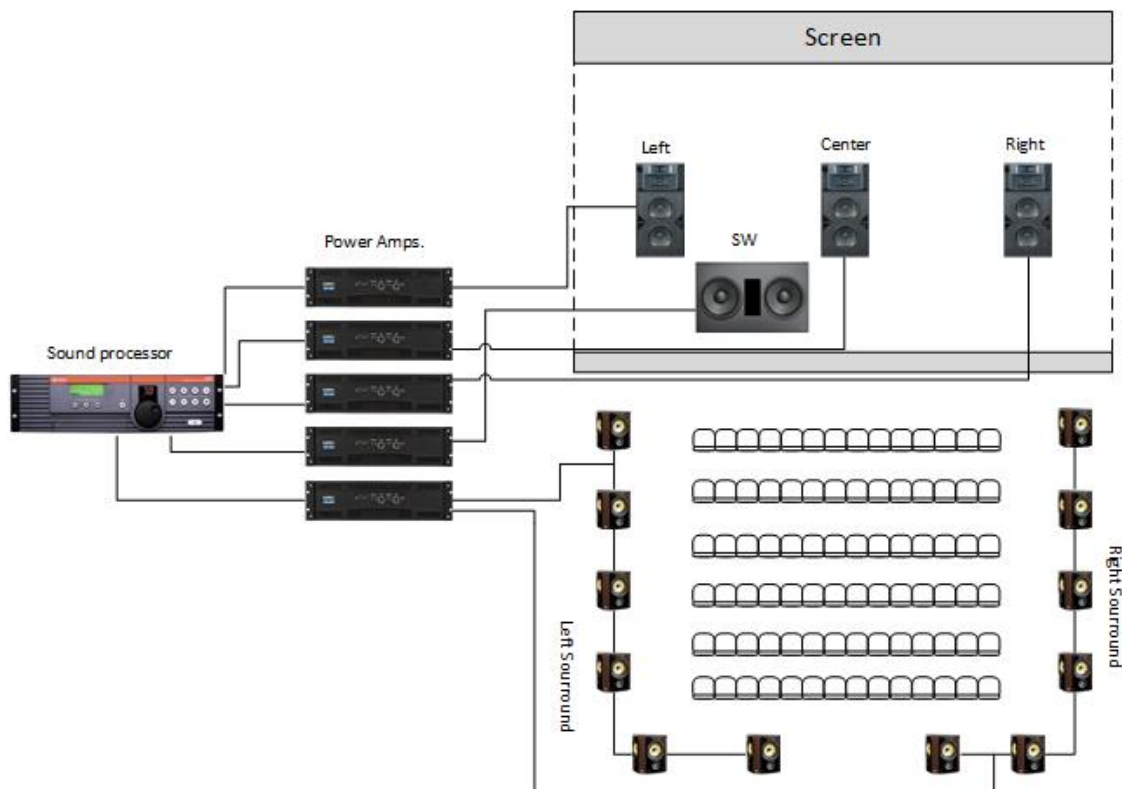
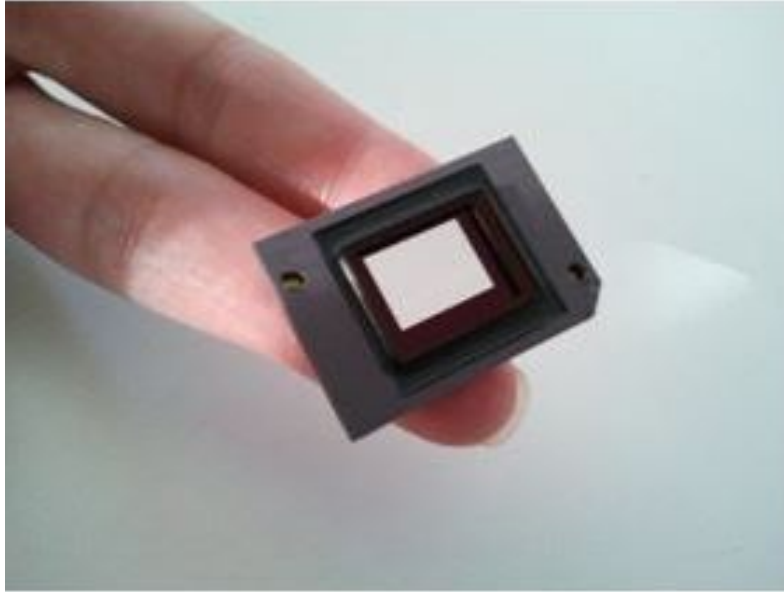


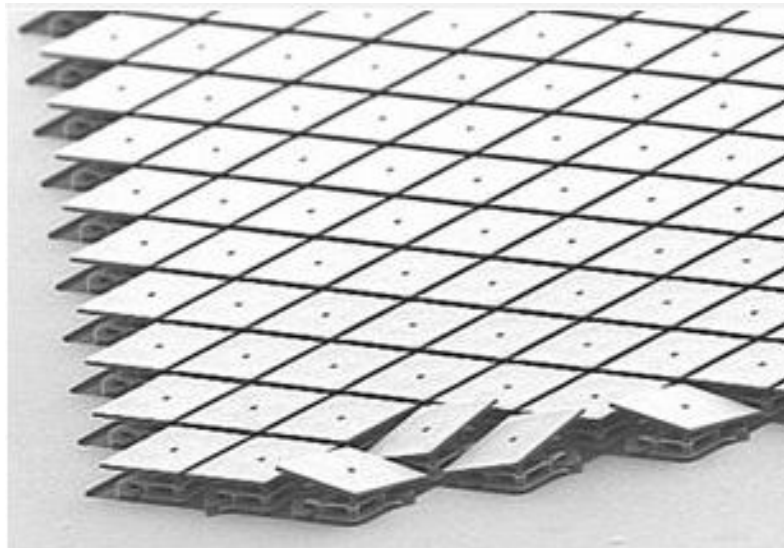
Figura 4: Sistema de sonido digital 5.1 en una sala cinematográfica, con todos los canales que integran éste sistema.

Fue en el año de 1998 cuando Larry Hornbeck, trabajando para la empresa Texas Instruments, desarrolló el Dispositivo Digital de Espejos DMD, (*Digital Mirror Device*)[25], el cual se convirtió en el corazón de la tecnología de proyección digital líder a nivel mundial, DLP (*Digital Light Projection, Proyección Digital de luz*), de la misma empresa Texas Instruments. Esta tecnología la implementaron los principales fabricantes de proyectores digitales cinematográficos a nivel mundial; Barco, Christie y NEC[25][26]. La Figura 5 muestra el dispositivo de

micro espejos desarrollado por Texas Instruments, utilizado en la tecnología DLP, en la Figura 5a se puede observar el físicamente el dispositivo, en la Figura 5b se observa un acercamiento microscópico a los espejos que lo componen.



(a) Circuito integrado DMD de Texas instruments.



(b) Acercamiento a los micro espejos de un DMD.

Figura 5: Dispositivo de micro espejos (DMD)[2].

Al desarrollarse en el año 2000 los primeros proyectores digitales para cine se equiparó, la calidad de proyección con la de sonido, provocando el cambio generacional y el cambio de tecnología de analógica a digital en el cine, teniendo

exhibiciones 100 % digitales[26]. Este cambio permitió el prescindir de las copias físicas de las películas, siendo ahora posible su almacenamiento en discos duros, abaratando los costos, reduciendo espacios y ruidos en caseta, al no ser necesario los sistemas y motores de arrastre. La Figura 6 muestra los sistemas de proyección digital empleados en la actualidad.



(a) Proyector digital Barco.



(b) Proyector digital Christie.

Figura 6: Projectores digitales cinematográficos.

Con la incorporación de los proyectores digitales, fue necesario el almacenar las películas y contenidos en computadoras especializadas que se denominaron servidores. La Figura 7 muestra las imágenes de dos servidores comerciales.



(a) Servidor Doremi.



(b) Servidor GDC.

Figura 7: Servidores cinematográficos comerciales.

Bajo los estándares de DCI, (*Digital Cinema Initiative, Iniciativa Digital para Cines*) se establecieron protocolos de comunicación, seguridad y sincronización para el manejo de contenidos digitales; tanto para mantener estándares de calidad, como para protegerse de actos de piratería[27][28][29]. En ese sentido se

desarrollaron sistemas denominados TMS (*Theater Managment System, Sistema de Manejo en Teatro*)[30][31][32] que permitieron el almacenar en un servidor central todo el contenido a exhibir en un complejo, intercambiar contenidos entre salas, monitorear el estatus de cada proyector, las condiciones de luces en sala, tipo de sonido operado, entre otras funciones automatizadas. La Figura 8, muestra el esquema de la arquitectura de un TMS en un complejo cinematográfico.

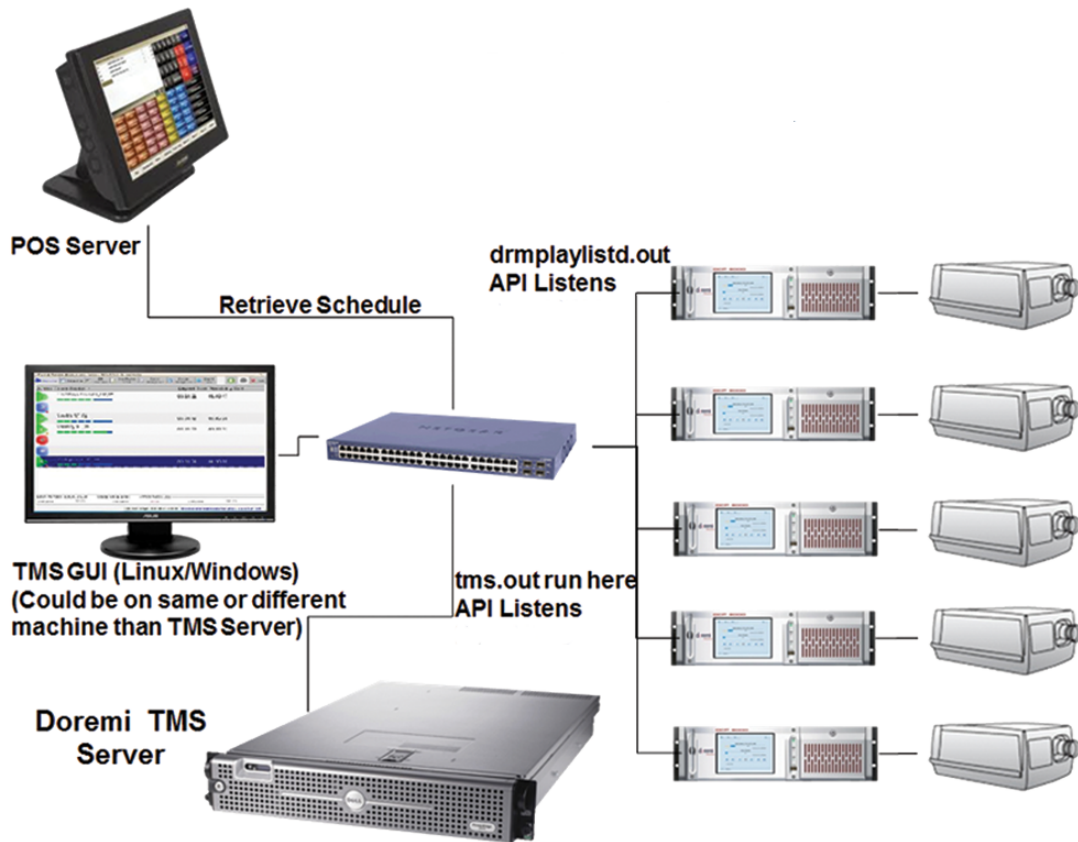


Figura 8: Arquitectura de un TMS cinematográfico.

El TMS fue la antesala para lograr un nivel de control, monitoreo y transmisión de contenidos mucho más eficiente y complejo. Esto permitió formar una red con las distribuidoras y fabricantes que suministran soporte técnico (mantenimiento preventivo y correctivo) con las compañías exhibidoras, elevándose los estándares de calidad en las exhibiciones y ha reducido los costos de operación y mantenimiento para las compañías. Esta red se denominó NOC (*Network Operation Center, Centro de Operación de red*)[33][34][35]. La Figura 9, muestra la arquitectura de un NOC en conexión al TMS de cualquier conjunto.

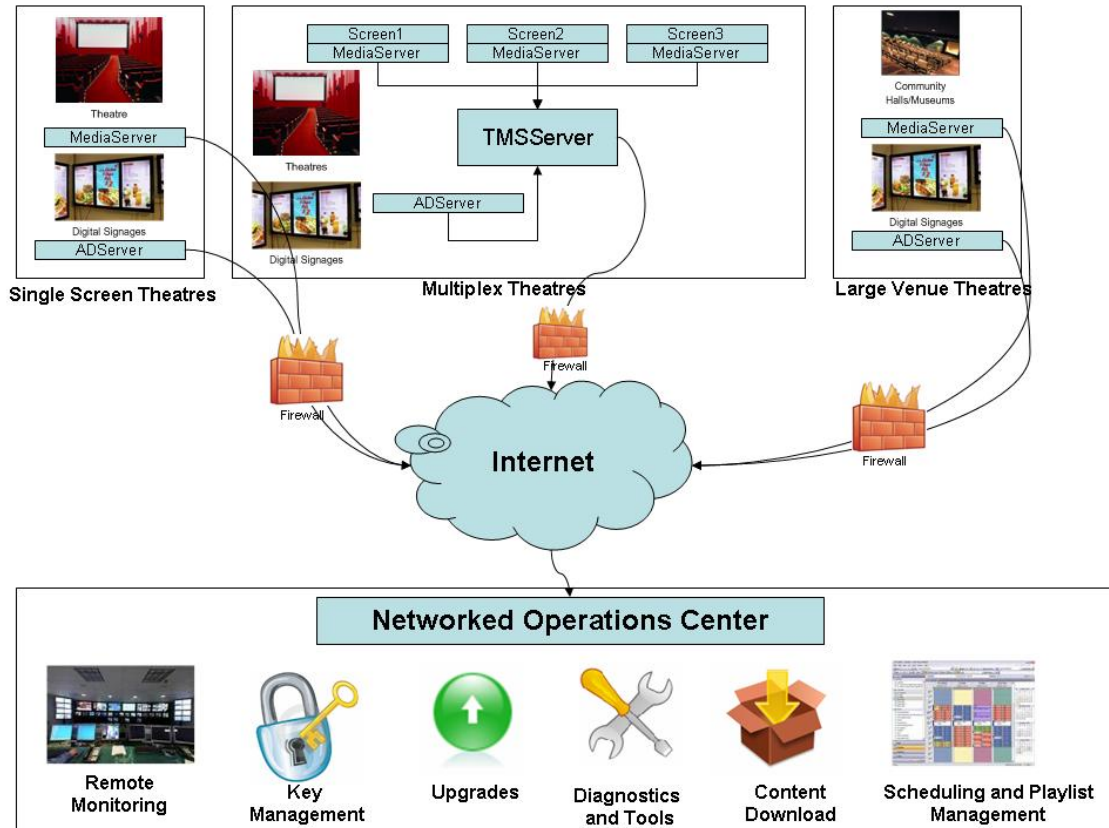


Figura 9: Arquitectura de un NOC cinematográfico.

Un NOC es el lugar en donde administradores supervisan, monitorean y mantienen una red de telecomunicaciones. Los NOC pueden ser considerados como una red de redes en donde se detalla el estatus de cada punto en la red (proyectos, servidores, nodos, etcétera). La Figura 10 muestra los centros de operación de los NOC implementados por grandes fabricantes mundiales como Barco y Christie.



(a) Instalaciones NOC Christie.



(b) Visualización del monitoreo en NOC Christie.



(c) Visualización del monitoreo en NOC Barco.



(d) Monitoreo en tiempo real de un conjunto

Sin embargo los sistemas de audio aun no han sido incorporados a esta tecnología. Si bien el sonido es grabado y reproducido de manera digital, las unidades de reproducción son mecánicas (bocinas), solo un fabricante, *IMAX*, integra un sistema de monitoreo para conocer el estado de cada uno de los canales de reproducción dentro de las salas[36]. Aun así, la cantidad de salas *IMAX* en el mundo es muy bajo, comparado con el gran número de salas a nivel mundial. Hasta el cierre de 2014, esta empresa contaba con 934 salas en todo el mundo, y se dividían entre complejos cinematográficos, museos, zoológicos, acuarios entre otros[?]. Si se compara con las 39,641 salas, que tan sólo Estados Unidos tenía en el 2011[1], resulta evidente que la mayoría de las salas de cine no cuenta con un sistema de monitoreo de audio.

Por lo cual las fallas de sonido aún tienen que ser reportadas por la audiencia, o se requiere de personal dedicado a monitorear todo el tiempo el estado del audio en una sala, generando esto baja eficiencia en los niveles y calidad de canales de audio cuando se presentan fallas.

La exhibición cinematográfica depende de maquinaria y equipo técnico. En consecuencia, existen fallas, averías y disfunciones en la exhibición de películas. De acuerdo a las definiciones elaboradas por la *IFAC (International Federation of Automatic Control, Federación Internacional de Control Automático)*[3] se cita:

FALLA: Es una desviación de una propiedad característica de un sistema con respecto a las condiciones usuales y estándar de operación. El modo de falla es la forma observable de ésta o de la disfunción y describe de manera precisa la manera en la cual el sistema no cumple su función, para el caso del cine se ejemplificaría en paros imposibles, arranques imposibles y paros de función.

AVERÍA: Corresponde a la interrupción permanente de la capacidad del sistema para cumplir una función requerida en condiciones específicas.

DISFUNCIÓN: Se denota cuando el sistema es incapaz con alguna de las funciones para las que fue diseñado, de manera intermitente.

Tanto fallas, como disfunciones y averías afectan la calidad en la exhibición, al mismo tiempo que incrementa los gastos de mantenimiento, disminuyendo por ende las ganancias de la industria. La competencia a nivel mundial entre exhibidoras, se ha vuelto año tras año más férrea en todos los países, generando que los consumidores atribuyan mayor peso a la calidad y al valor agregado de los productos y servicios que ofrecen estas. Si un cliente enfrenta constantes fallas técnicas al momento de asistir a su conjunto predilecto, difícilmente

regresará[37]. Lamentablemente las empresas dedicadas a la exhibición no proporcionan estadísticas respecto a quejas y fallas técnicas en la operación de sus salas[17], salvo a las distribuidoras propietarias de los filmes exhibidos, pero esta información no es de carácter público.

De los datos a los que se puede acceder sobre este rubro, existen algunos reportes que son de dominio público realizados en la India, sobre satisfacción de los clientes que acuden a los complejos de cines. Uno de esos reportes del año de 2010 elaborado por personal de la Indian Business Academy, reflejan que de un universo de 189 personas, al cuestionarlos sobre cual era su percepción sobre la proyección de la película a la que habían acudido, 69 se sentían satisfechos sobre la calidad de la proyección, 65 eran neutrales y 55 se sentían inconformes; el 29.1 % se encontraba inconforme con la calidad de proyección. Respecto a la calidad del sonido 77 manifestaron sentirse conformes, 59 no tenían una postura al respecto y 53 se sentían insatisfechos[38]; nuevamente un alto porcentaje.

Alrededor del mundo podemos encontrar reportes múltiples en diarios prestigiosos sobre funciones canceladas por factores de proyección y sonido que afectan y molestan a sus consumidores, por citar algunos, el Telegraph de Reino Unido [39], Correo del Orinoco en Venezuela [40], The Hollywood Reporter en Estados Unidos [41], Legión Este en Argentina [42], Progreso hoy en México [43].

Aunado a éstos también se pueden encontrar blogs de asociaciones civiles para la protección del consumidor, en donde es posible encontrar comentarios de quejas sobre las cadenas exhibidoras, incluso por zona y complejo, entre las quejas se encuentran las relacionadas con fallas técnicas en proyección y sonido. Ejemplo de estos sitios son *BBC.org*(*Council of Better Business Bureaus*); sitio de organizaciones civiles para reportar y clasificar empresas, y en su apartado de cinemas las quejas sobre las compañías exhibidoras de cine en Estados Unidos y Canadá [44]. En México se encuentra la asociación Al consumidor A.C. [45], entre muchos otros sitios de quejas de consumidores, y en la India existe la asociación de Consumer complaints [46], entre otros.

En el 2001, un estudio de la *Procuraduría Federal del Consumidor en México*(*PROFECO*) sobre la asistencia del público al cine [47], indica que el 7% de los asistentes al cine, han experimentado fallas técnicas durante la exhibición de una película, en donde se engloba tanto la proyección como el sonido. En los reportes de paros de función de los periódicos, como en los blogs de quejas, es posible constatar que cuando sucede un paro de función de una película, los espectadores exigen la remuneración de su dinero de entrada, y en muchos casos, también exigen la remuneración de su consumo en otras áreas fuera de la taquilla.

Si en base a supuestos, ya que sabemos que no se cuenta con cifras oficiales de remuneraciones por fallas en las exhibidoras [17], se considera, que tan solo

el 0.5 % de personas que acudieron durante el 2012 a ver una película, experimentó una falla técnica y se quejó pidiendo la remuneración de su entrada, y sabiendo que los ingresos tan solo de México en ese año fueron de \$10 mil millones de pesos, [15][17], la industria exhibidora de cine reportaría perdidas por MXN\$50 millones en remuneraciones de entrada por fallas técnicas en este país solamente, sin contar cortesías, ni reembolsos por consumos, así como gastos de reparación, y funciones a las cuales no hayan sido vendido boletos por encontrarse en avería alguna sala, donde el tiempo de reparación puede ser variable, e incluso el tiempo de reparación de estas puede superar mas de dos días[37].

Por otro lado, en base a la propia experiencia laboral adquirida durante 7 años como ingeniero técnico de servicio en el departamento de Proyección y Sonido de la empresa Cinépolis, se atendieron 3 regiones geográficas y se adquiría información de las estadísticas de todo el país. Constatando que al mes, por ejemplo una región de 250 salas presentaba alrededor de de 100 fallas técnicas sobre el equipo de Proyección y Sonido, que generaban alrededor de 8 a 12 paros de función; que podían variar de acuerdo a la temporada y la frecuencia de exhibición de películas en dichas salas. Lo que permite estimar un panorama del impacto que puede producir una falla crítica en cuanto a exhibición.

Además de las fallas críticas que llegan a detener una película, existen fallas que pueden estar presentes durante la exhibición sin llegar a causar un paro de función, pero si afectan la calidad de la exhibición, provocando una experiencia desagradable al espectador, y pueden presentarse como niveles altos, mala ecualización, distorsión en bocinas por daños físicos, saturaciones en amplificadores, entre otros. Todas estas fallas repercuten económicamente al exhibidor; nuevamente, quejas, reembolsos, perdida de clientes, por ejemplo[37].

Sumado a las cuestiones de calidad del audio, empiezan a surgir quejas y preocupaciones en cuestiones de salud de los espectadores en las salas.

Inicialmente, el estándar de ecualización y niveles en sala lo impulso la compañía *Dolby*. Su proceso se basa en emitir un ruido denominado rosa, y fija los niveles máximos de los canales frontales a 85dB, con una referencia en el procesador de audio [8][48]. Esta estandarización obtuvo el respaldo en Norteamérica por la *TASA* (*Trailer Audio Standard Association, Asociación de Estandarización de Audio en Trailers*)[48, 49].

Numerosos reportes e investigaciones señalan que al implementarse la proyección digital, las mezclas de audio incrementaron sus niveles tanto de grabación como de reproducción en sala, superando incluso en mas de 100dB. Por ejemplo, un reportaje de la cadena estadounidense *Kxan* titulado “*Are movie theaters damaging your hearing*” ¿Están los cines dañando tu audición? [50], plantea la pro-

blemática de la falta de regulaciones en los Estados Unidos sobre el nivel de exhibición de películas en las salas.

Además dicho reportaje llevó a cabo una investigación de diferentes complejos en el área de Austin, Texas, EE.UU., verificando 17 películas en 15 diferentes complejos. La investigación arroja que una película en una sala puede ser reproducida en la misma escena a 85 dB, y en otra sala a 98dB, e incluso 101dB. Una investigación de Smart Money, The Wall Street Journal[18], señala esta problemática en los cines, y referencia que niveles mayores a 85db puede dañar la audición de las personas, de acuerdo a investigaciones médicas. Mismos señalamientos son hechos en Inglaterra por periódicos[51] y organizaciones de salud[52]

Ante lo expuesto, resulta conveniente el poder contar con un sistema que sea capaz de monitorear e informar fallas tanto en proyección como en sonido en una sala de cine, que pueda incrementar la calidad y reducir perdidas por fallas.

1.2 SOLUCIÓN PROPUESTA

Por la problemática planteada, el desarrollo de un sistema de detección de fallas multicanal, en una sala de exhibición cinematográfica, capaz de conectarse a los sistemas de control digital de proyección, llevaría al mismo nivel de control y eficiencia al sonido con la proyección, eficientando tiempos de mantenimiento, costos en traslado, y sobre todo calidad de reproducción auditiva, llevando la calidad de exhibición a sus mejores estándares de calidad.

Se propone el desarrollo de un sistema de tales características, generando patrones acústicos (ruido blanco y/o ruido rosa), que puedan ser reproducidos en todos los canales de la sala cinematográfica y mediante el uso de micrófonos de medición, digitalizar las señales obtenidas para obtener varios segmentos de grabación de cada canal, y al aplicarle técnicas de procesamiento de señales, determinar si todos los canales de la sala, se encuentran funcionando correctamente, y en el caso contrario, emitir una firma de errores que pueda llegar a ser emitida a la red de control del cine.

La plataforma de desarrollo propuesta para éste proyecto, es la tarjeta de desarrollo DSKTMS3206713, que integra un Procesador Digital de Señales de la marca Texas Instruments TMS3206713, convertidores analógico-digital y digital-analógico, así como un codec estéreo AIC23, para adquisición de audio y reproducción del mismo, con conectividad mediante el programa Code composer.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 *Objetivo general*

Poder detectar de manera automática fallas de sonido en una sala cinematográfica mediante la implementación de un prototipo capaz de emitir patrones de prueba, adquirir y procesar la respuesta de audio de una sala de cine. Contribuyendo al incremento de calidad en la exhibición cinematográfica, reduciendo costos de mantenimiento y tiempos de respuesta ante fallas, contribuyendo a la experiencia del consumidor aumentando su comfort y brindando calidad de reproducción de sonido en las salas cinematográficas.

1.3.2 *Objetivos particulares*

- Crear un sistema de grabación multicanal de audio, digitalizando cada una de las señales adquiridas, mediante el empleo de un DSP como motor de procesamiento, capaz de grabar y mediante procesamiento de señales, determinar el estatus de cada canal involucrado en una exhibición cinematográfica, capaz de detectar las anomalías relacionadas a la reproducción de audio, tales como niveles inadecuados, falta de componentes en un canal, o mal funcionamiento de las unidades involucradas en los mismos, emitiendo una firma de errores que pudiera ser enviado al sistema de control digital ya existente en los cines actuales.
- Desarrollar el sistema propuesto, mediante el DSK (Digital Starter Kit) TMS3206713, módulo de desarrollo que incorpora el DSP del fabricante Texas Instruments 6713, de 32 bits, que incorpora un Códec AIC23 del mismo fabricante para el manejo estéreo de audio en 32 bits (16 bits por canal), tanto para adquisición como para envío de datos.
- Desarrollar los algoritmos de procesamiento para la conversión del audio a un sistema digital, así como los algoritmos de procesamiento para la detección de fallas y emisión de firma de errores de los mismos.
- Emplear la metodología de un sistema de detección de fallas para este prototipo, especialmente de modelos frecuenciales, desarrollando algoritmos que utilicen la técnica de *FFT(Fast Fourier Transform, Transformada Rápida de Fourier)*, para la la determinación del estatus de cana canal.
- Desarrollo de las tarjetas preamplificadoras de audio para el sistema de micrófonos de medición empleados para grabar de forma eficaz el audio en sala.

- Implementación de pruebas en condiciones similares de una sala cinematográfica para fijar un modelo de referencia ideal, y modelos para las fallas inducidas a cada uno de los canales y así poder determinar el estatus de los mismos, y por lo tanto poder emitir una firma de errores.

1.4 HIPÓTESIS

Se creó que mediante la generación de patrones de ruido blanco reproducidos en un barrido temporizado, digitalizando y procesando cada una de las respuestas de los canales que componen una sala cinematográfica, es posible determinar fallas de operación.

1.5 METODOLOGÍA

- Después de encontrarse la sala de pruebas en condiciones optimas, procedimiento que se describe el capítulo 3, se procede a obtener un modelo característico ideal de la sala. Éste modelo se obtiene en dominio de la frecuencia después de realizar la grabación de la respuesta de cada uno de los canales y procesarlo mediante Transformada Rápida de Fourier (FFT) de 512 puntos, formando una base de datos histórica mediante la repetición del experimento en 30 ocasiones por cada posición del micrófono de grabación. Se experimenta con 3 diferentes posiciones del micrófono de grabación, para determinar si es necesario el empleo de 3 micrófonos o con uno es suficiente para determinar el estatus de la sala.

La Figura 11 representa la metodología implementada en el experimento. Se inicia con un algoritmo generador de ruido blanco que es inyectado de manera secuencial a cada uno de los canales de la sala de manera individual. El ruido blanco es amplificado hasta alcanzar la presión sonora correspondiente a cada canal, la respuesta de las tres unidades (altas, medias y bajas) de los altavoces es grabada en segmentos de memoria del DSK, y posteriormente procesada para obtener sus componentes en frecuencia.

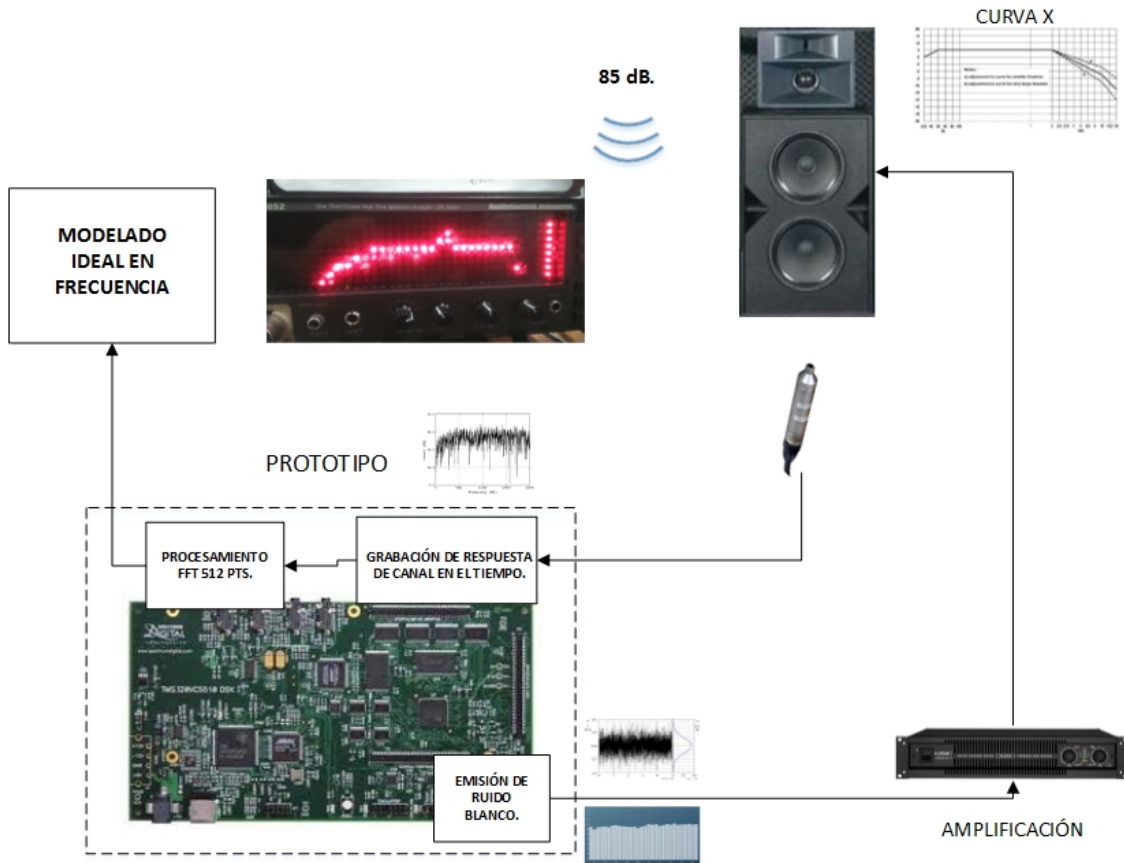


Figura 11: Metodología empleada para obtener modelo ideal de la sala de cine.

Las tres posiciones del micrófono de grabación empleadas, se muestran en la Figura 12.

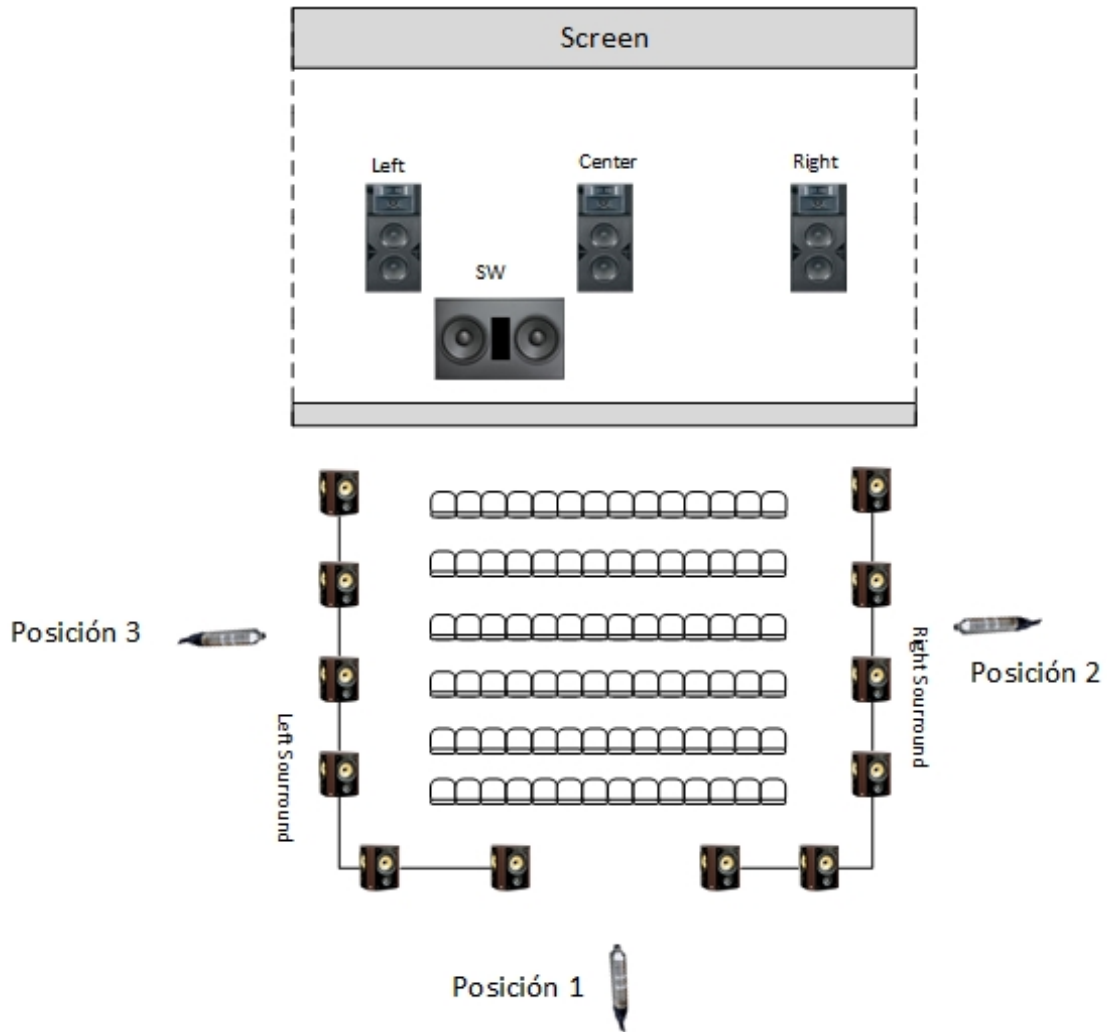
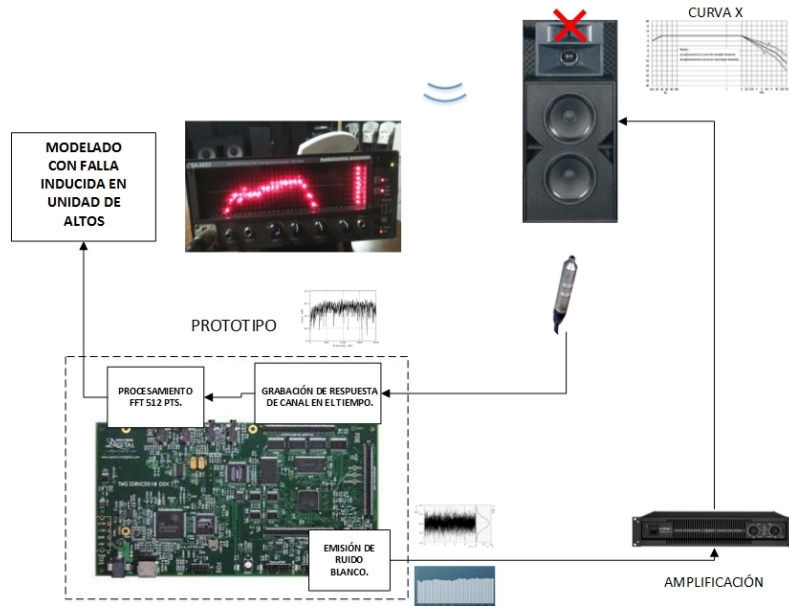
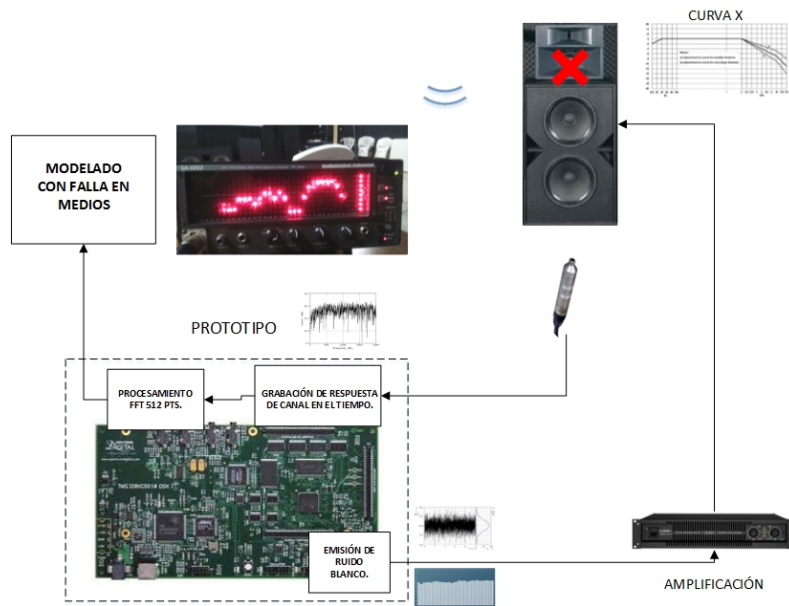


Figura 12: Posición de los micrófonos en el modelado de una sala cinematográfica.

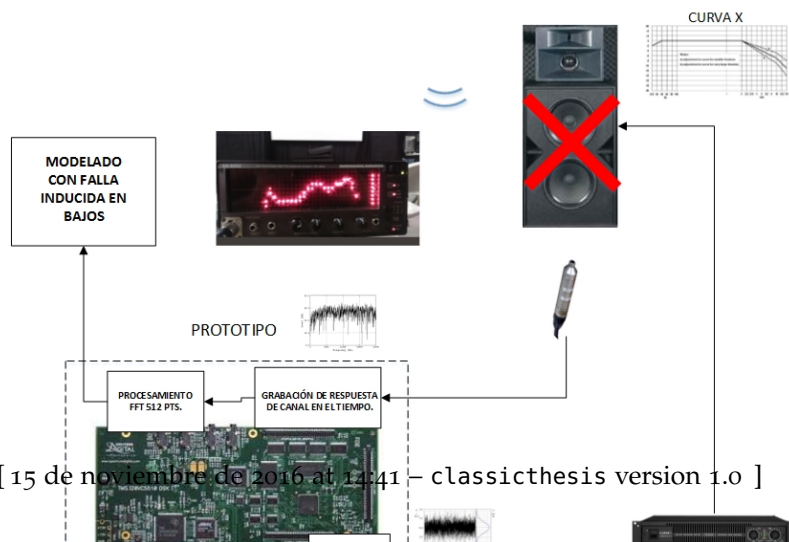
- Después de obtener el modelo ideal se procede a inducir fallas a cada canal, cada una de las unidades de los altavoces es desconectada, recavándose la estadística durante 30 experimentos por unidad desconectada y por posición de micrófono. La Figura 13 muestra la inducción de fallas en la metodología propuesta.



(a) Modelado sin unidad de altos.



(b) Modelado sin unidad de medios.



Además de las fallas inducidas a las unidades, también se induce la ausencia de canal, fallo en unidad de bajos, baja presión sonora y alta presión sonora.

- Para el modelado de los canales de surround se emplean 4 bocinas triamplificadas por cada canal de surround y se modela de manera ideal ambos canales de manera similar que los canales frontales. Se emite el ruido blanco a través del canal y para el canal surround izquierdo (Sl) se graba la respuesta con el micrófono en la posición *mic1* y posteriormente se repite el procedimiento con el mismo número de repeticiones, pero ahora tomando la respuesta con el micrófono en posición *mic2* tal como se visualiza en la Figura 14

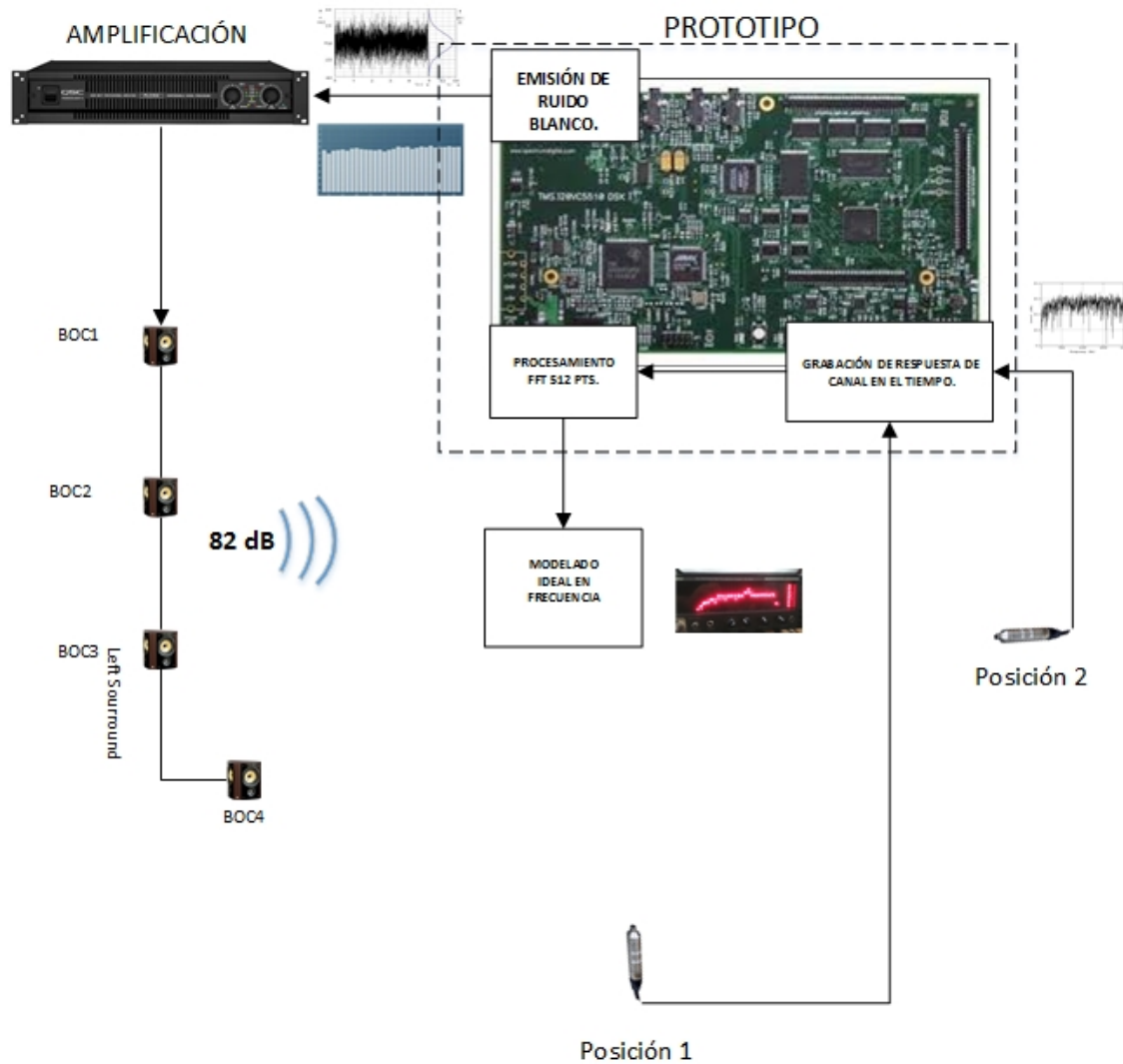


Figura 14: Modelado ideal del canal sl.

- El mismo procedimiento es aplicado para el modelado del surround derecho (Sr), en donde se utilizan las mismas bocinas, se reproduce el ruido blanco, y se graba la respuesta para obtener el modelado ideal del canal ahora empleando los micrófonos en posición 1 y posición 3, tal cual lo ilustra la Figura 15

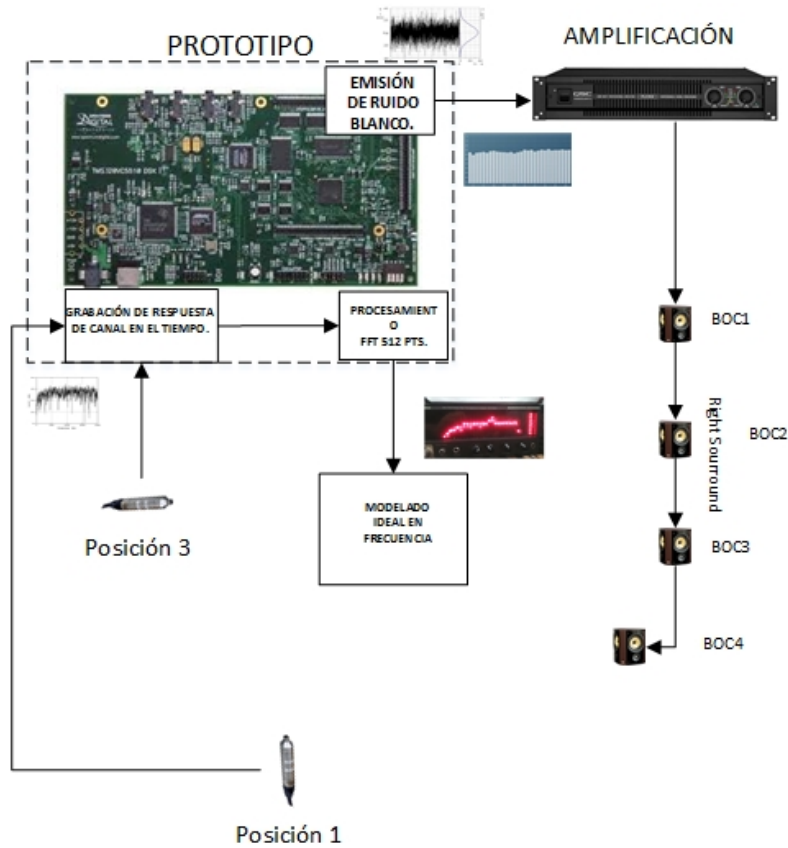
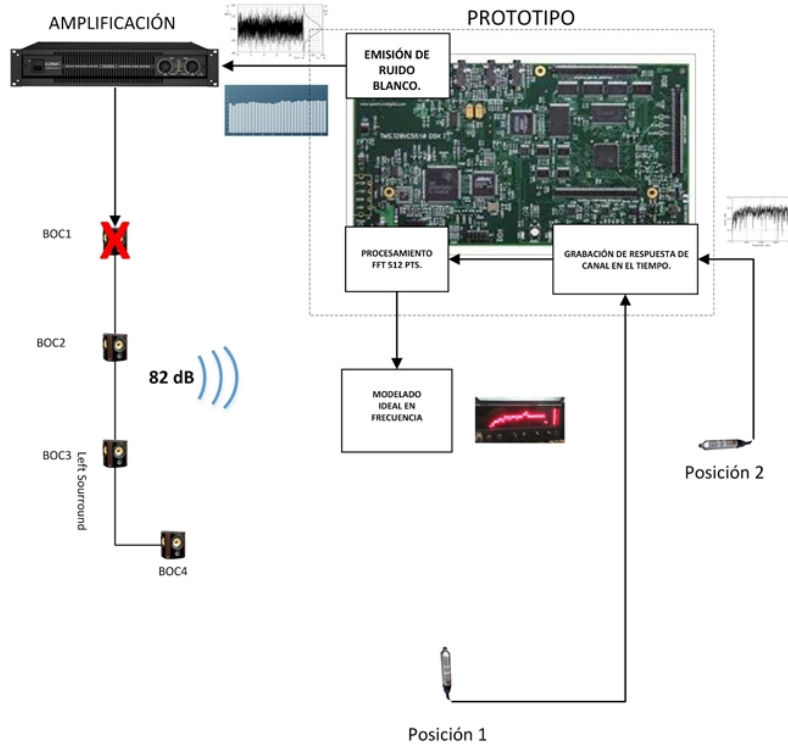
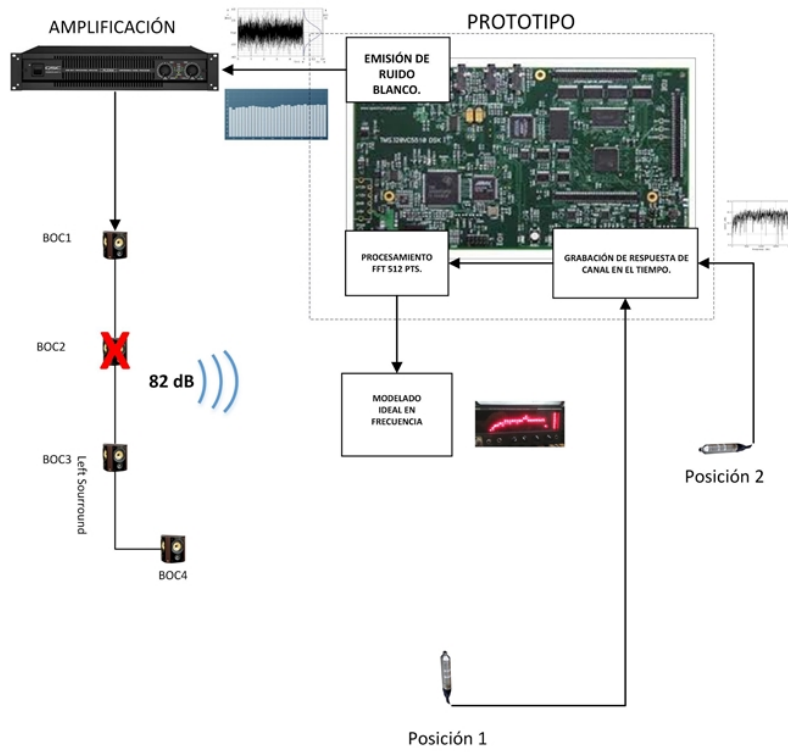


Figura 15: Modelado ideal del canal sr.

- Una vez obtenido el modelo de cada canal surround, análogo al procedimiento de los canales frontales, son inducidas las fallas que se desean detectar, en este caso, no se desconectan unidades, sino cada una de las bocinas que componen los canales de surround, así como se varían las potencias sonoras de dichos canales. La Figura 16 y la Figura 19 ilustran cada una de las fallas inducidas al canal sl.

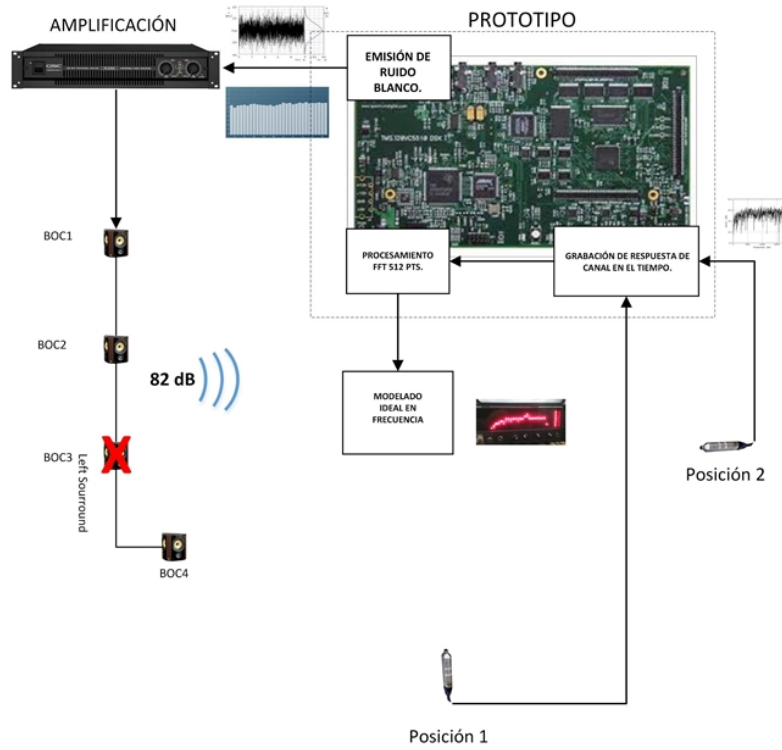


(a) Modelado sl sin bocina 1.

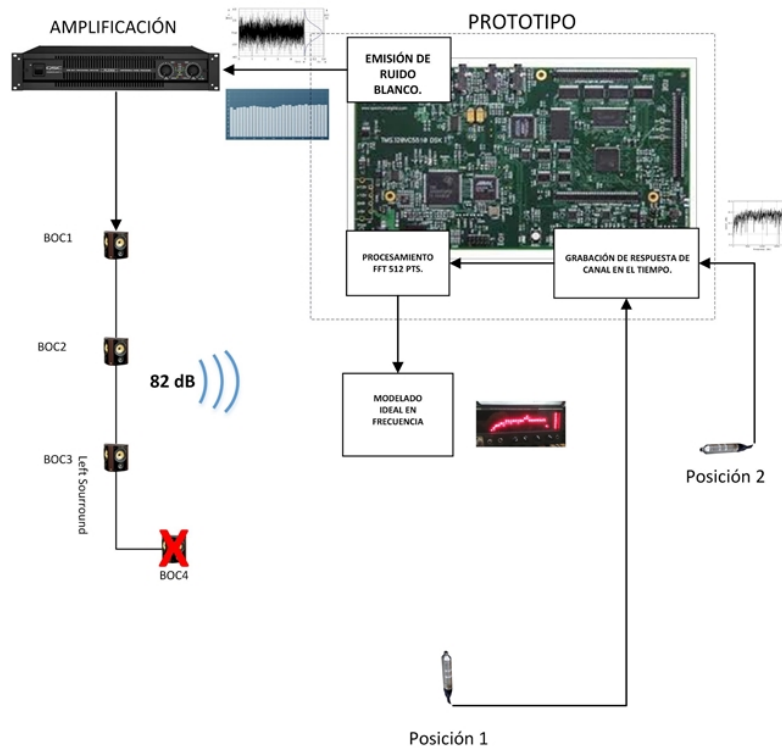


(b) Modelado sl sin bocina 2.

Figura 16: Inducción de fallas en bocinas 1 y 2 canal Sl.



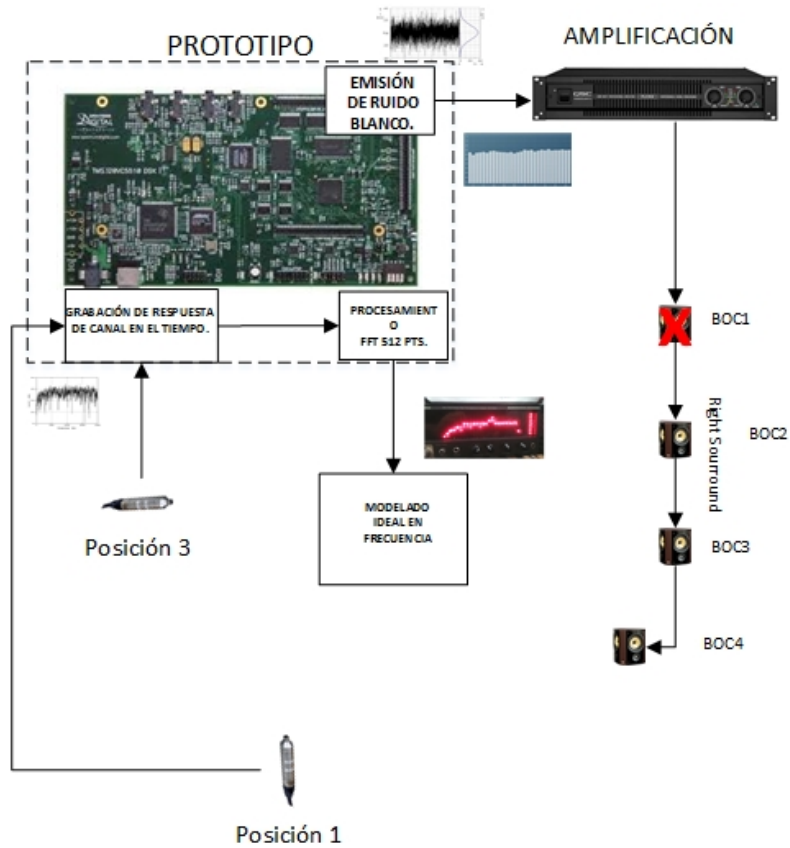
(a) Modelado sl sin bocina 3.



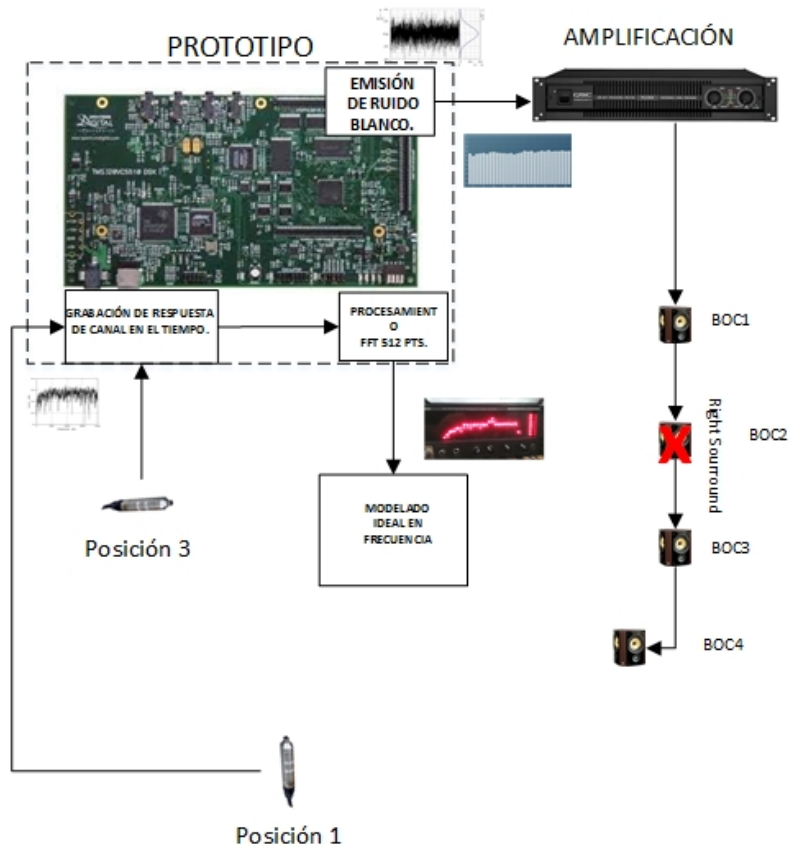
(b) Modelado sl sin bocina 4.

Figura 17: Inducción de fallas en bocinas 3 y 4 canal SL.

- El mismo procedimiento de inducción de fallas del canal sl se aplica para modelar las fallas del canal sr como se visualiza en la Figura 18 y en la Figura 19.



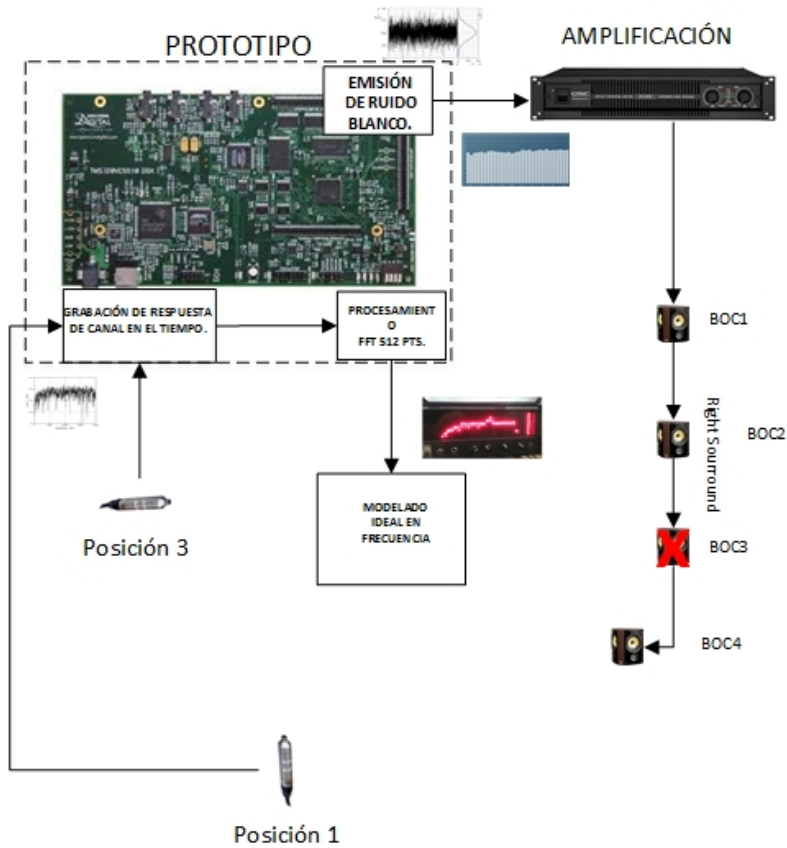
(a) Modelado sr sin bocina 1.



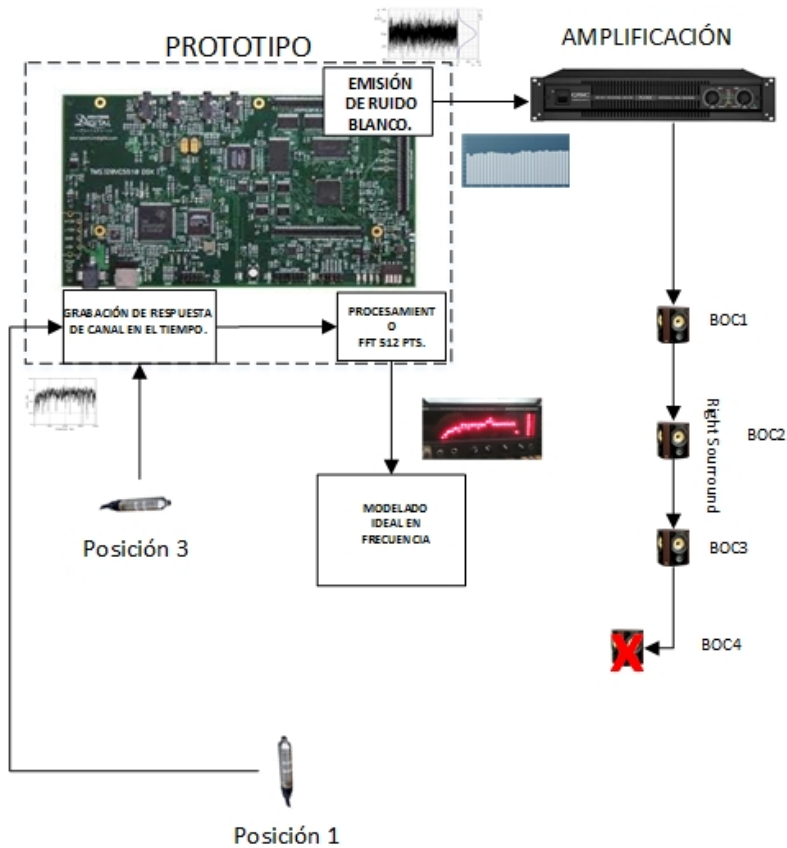
(b) Modelado sr sin bocina 2.

[15 de noviembre de 2016 at 14:41 – classicthesis version 1.0]

Figura 18: Inducción de fallas en bocinas 1 y 2 canal Sr.



(a) Modelado sr sin bocina 3.



(b) Modelado sr sin bocina 4. [15 de noviembre de 2016 at 14:41 - classicthesis version 1.0]

Figura 19: Inducción de fallas canal sr.

- Para el caso del canal del subwoofer (sw), se reproduce el ruido blanco habiéndose asegurado que la presión sonora sea la adecuada (90dB) y se repite 30 veces el experimento para obtener el modelo espectral del canal. Este procedimiento se observa en la Figura 20.

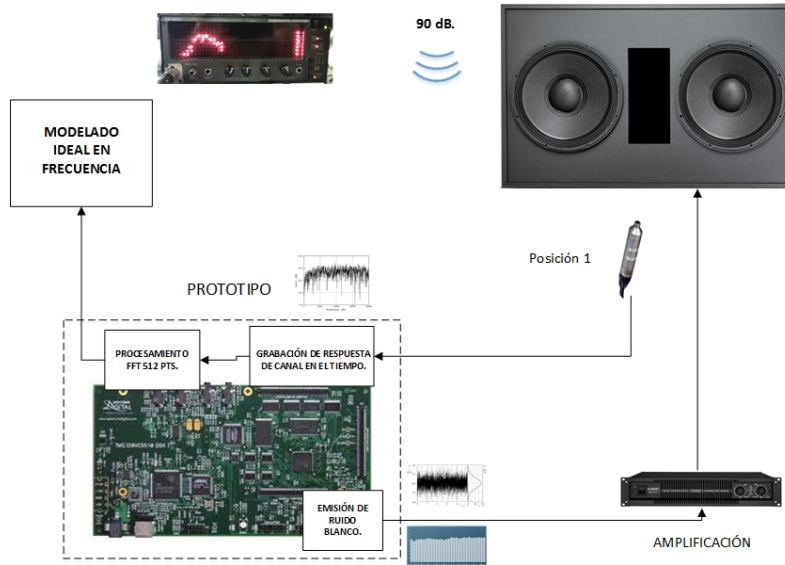


Figura 20: Modelado ideal del canal sw.

Al igual que el resto de los canales, una vez obtenido el modelo ideal, se inducen las fallas al canal para obtener el modelado con fallas, en este caso, las fallas inducidas son alta potencia sonora y baja potencia sonora.

Parte II

THE SHOWCASE

Se recomienda agregar información que de un preámbulo aquí. You can put some informational part preamble text here. Illo principalmente su nos. Non message *occidental* angloromanic da. Debitas effortio simplificate sia se, auxiliar summarios da que, se avantiare publicationes via. Pan in terra summarios, capital interlingua se que. Al via multo esser specimen, campo responder que da. Le usate medical addresses pro, europa origine sanctificate nos se.

MARCO TEÓRICO

Las industrias con el paso del tiempo, han visto la necesidad de incrementar la calidad en sus procesos para mejorar la satisfacción de sus clientes, eficientar tiempos y maximizar ganancias. Ya se trate de una industria de producción o una industria de servicios, la baja calidad en los procesos conlleva pérdidas tanto de tiempo como de calidad, lo cual se ve reflejado en las percepciones.

La complejidad en los equipos tecnológicos han provocado el diseño de métodos avanzados de automatización, tanto para la supervisión y monitoreo de procesos, como para la detección y diagnósticos de fallas.

La supervisión en línea es una de de las herramientas que emplean los sistemas de control para monitorear las variables implicadas en los procesos. La industria del cine implementa técnicas en los sistemas de control automático para el monitoreo de su operación, por ejemplo un NOC. En este sentido se puede decir que el objetivo global de un sistema de control automático consiste en:

1. Llevar y mantener el proceso en las condiciones de operación nominales, para las que fue diseñado, a pesar de la existencia de perturbaciones e incertidumbres en los parámetros de las unidades.
2. Vigilar que no se desvíe demasiado del funcionamiento deseado y generar acciones correctivas en caso de ser necesario.
3. Llevar el proceso a otro punto de funcionamiento, compatible con la seguridad y las consignas de funcionamiento, en caso de condiciones no previstas, como pueden ser las fallas.

Por tanto, un sistema de control confiable debe incluir tareas continuas de monitoreo para estar en condiciones de actuar ante emergencias y condiciones imprevistas[3].

2.1 FALLAS, DETECCIÓN Y DIAGNÓSTICO

Para poder hablar de un sistema de diagnóstico, se debe entender, que diagnosticar significa genéricamente recoger y analizar datos para evaluar problemas de diversa naturaleza. Las funciones que el sistema de diagnóstico debe realizar son múltiples. El proceso de diagnóstico está formado por varias tareas que

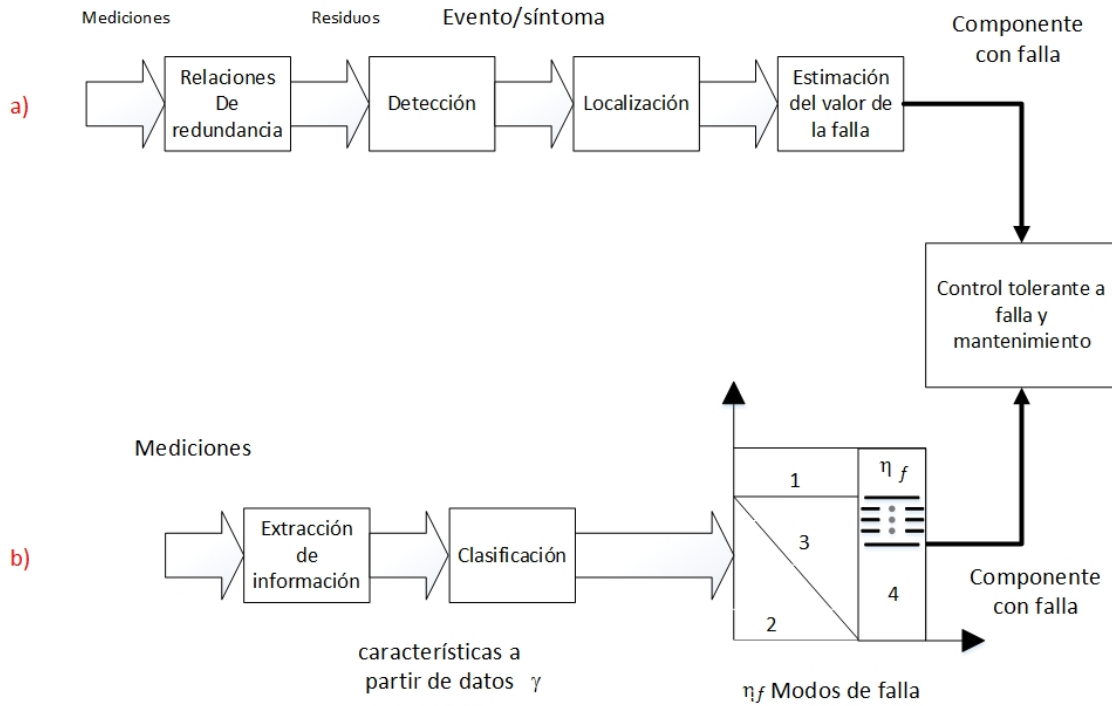


Figura 21: Procedimiento de diagnóstico a partir de mediciones del proceso. a) Con modelo matemático. b) con modelo de señales para n_f escenarios o clases de fallas considerando cl características y una matriz de datos históricos y [3].

pueden realizarse por etapas. Estas etapas pueden ser visualizadas en la Figura 21

La Figura 21 describe los dos caminos que pueden seguirse una vez obtenidas las mediciones y después de procesarlas, es posible obtener un conjunto mínimo de componentes dañados gracias al conocimiento sobre el proceso y sus modos de falla. La elección del método es consecuencia de la disponibilidad del conocimiento sobre el proceso, el cual condiciona al conjunto de algoritmos de diagnóstico posible de usar. Cuando el comportamiento del proceso puede escribirse bajo la forma de un modelo matemático explícito, la secuencia que hay que seguir se muestra en la Figura 21, secuencia a). En contra parte, la Figura 21, secuencia b), describe otro tipo de procedimiento, donde por medio de cl características de mediciones, seleccionadas *a priori*, considerando el tipo de fallas que se busca determinar, o de un arreglo de datos históricos de las señales o secuencias de datos Y , se deben reconocer n_f clases de fallas. No hay que olvidar que una falla es la desviación de una característica de un sistema con respecto a un comportamiento normal, y el punto de partida para diagnosticar-

la son las mediciones y señales brutas del proceso indicadas por las flechas más a la izquierda en ambos procedimientos de la Figura 21.

En el caso del procedimiento con modelo matemático, primero hay que detectar la existencia de una falla, esto se hace gracias a señales específicas llamadas indicadores de fallas conocidas comúnmente como **residuos**. Estos indicadores se generan usando las mediciones de las entradas y salidas reales del proceso con ecuaciones específicas, deducidas del modelo, que se llaman **relaciones de redundancia analítica**; los indicadores se convierten en **síntomas**, que son eventos que resultan de la interpretación de su valor. Esta etapa se conoce como **detección**. En el caso más sencillo, esta interpretación es booleana, y examina el valor del residuo respecto a un umbral, si el residuo es más pequeño que este umbral, no hay síntoma de falla. Se puede comparar esto con la generación de alarmas, pero aquí no se analiza directamente una medición sino una señal que puede no tener significado físico y que está diseñada específicamente para tener buenas propiedades desde el punto de vista de diagnóstico. La **localización** es la segunda etapa y consiste en usar uno o varios indicadores o síntomas para determinar precisamente el conjunto de componentes físicos de operación dudosa o anormal. Este conjunto debe ser lo más pequeño posible para hablar de que se llevo a cabo un **diagnóstico mínimo**. La identificación de la falla significa determinar que elemento del sistema está fallando y cómo se manifiesta.

En el caso del procedimiento con modelos de señales, secuencia *b* de la Figura 21, se procesan conjuntos de datos históricos o experimentos para conseguir **características** o **atributos**, como pueden ser promedios, correlaciones, presencia de armónicos o una combinación de señales, las cuales deben ser relevantes para el diagnóstico de las n_f clases de falla. En este caso, se parte del conocimiento de las alteraciones o cambios de las señales bajo el efecto de una falla, este conocimiento proviene del conjunto de experimentos registrados a lo largo de la vida del proceso, y de la experiencia y observación del ingeniero encargado de éste. Estos atributos son considerados a partir de una **clasificación** o un **análisis estadístico**, de una o mas variables, que permite, en el espacio definido por los atributos, determinar el modo de falla correspondiente a la situación analizada, y entonces concluir cuáles son los componentes con un funcionamiento anormal o dudoso. En esta familia de procedimientos se pasa directamente de los atributos a los modos de falla, cuando se han determinado correctamente las fronteras de las clases o el límite que hace que se prefiera una hipótesis estadística u otra.

La tarea de **identificación** de una falla se refiere a la determinación del comportamiento preciso de ésta. El mayor problema al que se enfrenta la etapa de detección es el asegurar que cuando el proceso no se comporta de la manera prevista, se debe a una falla. Esto podría deberse a una perturbación importante, que lleva al proceso a un punto de funcionamiento fuera de lo normal,

pero no es una falla. **Discernir entre fallas y perturbaciones** que no se pueden medir es un problema difícil, y muy pocos métodos de diagnóstico tienen capacidad para ello, sobre todo cuando hay poca información del estado interno del proceso. Otra dificultad durante la detección surge cuando el efecto de una falla no se percibe fácilmente, esto puede ocurrir cuando los sensores son poco sensibles o cuando el propio sistema de control retroalimentado corrige, y, por tanto, los errores entre las variables por regular y las señales de referencia son muy pequeñas[3].

Por lo descrito, se ha visto que el diagnóstico puede usar modelos de señales o modelos analíticos para describir el comportamiento del sistema. En el modelo de señales se necesita disponer de grandes bases de datos, que revelen tanto el comportamiento normal como el de la falla; mientras que en el modelo analítico, se necesita un conocimiento profundo del sistema. Dependiendo del proceso estudiado y de la información existente, se debe seleccionar la forma de abordar el problema del diagnóstico.

De acuerdo a las descripciones de los sistemas de diagnósticos ya analizados y las características del proceso en el presente trabajo, se desarrollará un modelo basado en comportamiento de señales.

2.1.1 *Métodos basados en el diagnóstico de señales*

Estos métodos son muy útiles y recomendables cuando no se puede obtener fácilmente un modelo y los datos son ricos en información, además, dichos métodos son recomendables en procesos con pocas señales, pero con una idea clara de lo que ocurre globalmente en el proceso. Este es el caso de plantas industriales con pocos cambios de operación y, por tanto, con pocos cambios en los valores de las variables representativas de la calidad del producto y condiciones de la producción. Una sala de exhibición cinematográfica puede ser considerada como una planta de operación de servicios, donde los parámetros de ajuste no son alterados con frecuencia, por lo cual, las variables representativas en cada canal de audio, varían muy poco o nada, salvo cambios en equipos o fallas técnicas.

Los métodos basados en señales se dividen en dos grupos: los que describen la información de las señales en matrices de datos de acuerdo con los modos de funcionamiento del sistema y los que manejan los datos a través del conocimiento de la energía de la señal en el dominio frecuencial. Los datos sin procesamiento se convierten en atributos, que permiten discernir los diferentes modos, la dificultad de esta tarea de conversión es muy variada, depende de los conocimientos disponibles y se acostumbra complementar con experiencia e información reportada por expertos.

Una desventaja de estas herramientas es que, por lo general, se procesa solamente una señal a la vez, una opción viable para algunos casos es usar parámetros estadísticos, como el valor promedio o varianza de la señal o de algunas características propias de las señales, como podría ser el máximo sobrepaso ante la respuesta al escalón, o el asentamiento, por mencionar algunas.

Una opción muy usada en la práctica para la detección de fallas es considerar la señal en el **dominio de la frecuencia** y analizarla con herramientas clásicas como son: la Transformada Rápida de Fourier, la transformada de Fourier de tiempo reducido o con otros métodos modernos como las onduletas o wavelets. De hecho, existen aplicaciones como los sistemas rotativos y los circuitos eléctricos de corriente alterna donde las señales que aportan información sobre el estado de los mecanismos son armónicas. En estas condiciones, un análisis armónico permite detectar aquellas fallas que provocan frecuencias atípicas y oscilaciones parásitas de energía relevante[3].

2.2 DIAGNÓSTICO BASADO EN PROCESAMIENTO DE SEÑALES

Considerando el caso de estudio que se aborda en este trabajo y en base a lo descrito en secciones anteriores, este proyecto está basado en un método de detección de fallas en el comportamiento de señales, y maneja los datos en el dominio de la frecuencia, analizando los armónicos de las señales emitidas a través del sistema de audio de la sala y empleando técnicas de *Transformada Rápida de Fourier*.

De manera análoga a los fusibles y flotadores, para el caso de exceso de corriente en un circuito eléctrico y de nivel en un sistema hidráulico, la detección automática para casos simples mediante software puede hacerse al verificar que cada una de las señales no sobrepasen límites inferiores y superiores. En términos de relaciones y de lógica, esta condición se reduce a la ecuación:

Si

$$y_{min} > y(t) \vee y(t) > y_{max} \Rightarrow sntomas(t) \neq 0 \quad (1)$$

esto es fácil de implementarse en software para el monitoreo el proceso, y conocer cuando opera en condiciones normales mediante el monitoreo de la variable $y(t)$ con ayuda del síntoma $s(t)$.

2.3 FORMALIZACIÓN DEL PROBLEMA DE DETECCIÓN CON CARACTERÍSTICAS NOMINALES

El procesamiento de una señal consiste en proponer modelos o transformaciones que generen nuevas representaciones de ésta. El objetivo de las transforma-

ciones es visualizar e interpretar, de forma más clara, algunas características de la señal, permitiendo un mejor análisis de la misma. Así, para los sistemas de diagnóstico, el procesamiento de las señales ayuda a discernir la presencia de síntomas, discriminando información irrelevante para la detección.

Los procedimientos no requieren el concepto de causa-efecto de un sistema dinámico. Cuando se maneja más de una variable, los métodos capturan de manera implícita las correlaciones entre los datos, debidas a balances de materia, de energía u otras. Entonces, algunos autores llaman a este tipo de métodos **sin modelo**, dado que explícitamente no se conocen los modelos analíticos generadores de las señales, sin embargo, el desconocimiento de las leyes de generación no implica la ausencia de patrones en los datos que se manejan. De hecho, para usar los métodos, se necesita la representación de una o varias señales, basada en características específicas. Así, los modelos de comportamiento se ajustan con base en las señales adquiridas durante el funcionamiento normal y anormal del sistema. En general, se habla de una señal $y(t)$ con l características, las cuales integran su patrón:

$$C_{ar} = \{c_1, c_2, \dots, c_{l-1}, c_l\} \quad (2)$$

Algunos ejemplos de lo anterior son:

- Para la textura de cierto material, la rugosidad, el espesor, etcétera.
- **Para una señal específica de audio, los coeficientes de Fourier, tonalidad, etcétera.**
- Para la curva de reacción en un reactor por lotes (batch), el tiempo de subida de la concentración, el valor máximo de la temperatura, etcétera.

Los valores de las características se definen y ajustan, por lo general, fuera de línea, analizando si es posible, diferenciar el comportamiento normal del anormal con ellos. La elección del vector de las características C_{ar} es de gran importancia para un buen diagnóstico, pues se busca minimizar el número de parámetros, para evitar el aumento de la complejidad computacional, sin perder información útil.

La búsqueda del cambio en el patrón esperado para la detección determina la forma en la que señal debe ser analizada. Una diferencia básica para el estudio es saber si se trata de señales que se pueden describir perfectamente, llamadas determinísticas o aleatorias, cuya representación es un conjunto de señales $y_a(t)$ provenientes de un proceso aleatorio con a perteneciente a I , donde I es el conjunto de índices de las señales.

El vincular el comportamiento de las señales, las cuales provienen de mediciones y de la bitácora de operaciones con comportamientos normales y anormales, requiere cierta experiencia de los fenómenos en cuestión; similar al diagnóstico médico. En ciertas aplicaciones, este conocimiento se presenta en forma de un mecanismo de inferencia mediante redes bayesianas o neuronales y árboles de decisión. En otros casos, un simple modelo temporal del valor medio y de la varianza, o un espectro frecuencial, pueden ser usados como parámetros característico C_{ar} [3].

La Figura 22 muestra un esquema general de las dos tareas que se llevan a cabo para la evaluación de características de señales, con vistas a un diagnóstico. La parte superior se ejecuta fuera de línea, y en ella se realiza la modelización o la transformación de las señales por considerar, y el aprendizaje del patrón por reconocer. La parte inferior tiene como función verificar, para cada nuevo experimento o señal, la condición de falla, a partir de los parámetros ajustados fuera de línea. La detección, con procesamiento de señales, se basa en pruebas de coherencia o incoherencia entre las características de la señal actual y el patrón definido por C_{ar} . Así, bajo la suposición de que desviaciones en el comportamiento normal se reflejan en cambios en los valores de características c_i , se estima la similitud de las características, entre el patrón y la señal actual, y se extrae del resultado una conclusión. La evaluación del diagnóstico, puede realizarse en tiempo real. En ciertas circunstancias, el sistema de diagnóstico puede ser ejecutado solo de vez en cuando, o de manera periódica; en procesos por lotes, éste se puede realizar en ciertas etapas del ciclo de trabajo.

2.4 PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES

El Procesamiento Digital de Señales se relaciona con los aspectos prácticos y teóricos de la representación de la información de las señales, de manera digital, con el uso de computadoras o hardware especializado en propósitos digitales, como un *Procesador Digital de Señales (DSP)*, ya sea para extraer la información, o transformar la señal en propósitos útiles.

Una señal puede ser definida como la variación de cantidad por la cual la información es transmitida respecto al estado, las características, la composición, la trayectoria, el curso de acción o la intención del curso de la señal. *Una señal es una manera de transmitir información.* La información transmitida en una señal puede ser usada por humanos o máquinas para la comunicación, transmisión, toma de decisiones, control, exploración, etc.

Los métodos de procesamiento de señales, han evolucionado en complejos algoritmos que apuntan a la utilización óptima de la información para lograr el mejor desempeño. En general, los requerimientos computacionales para los

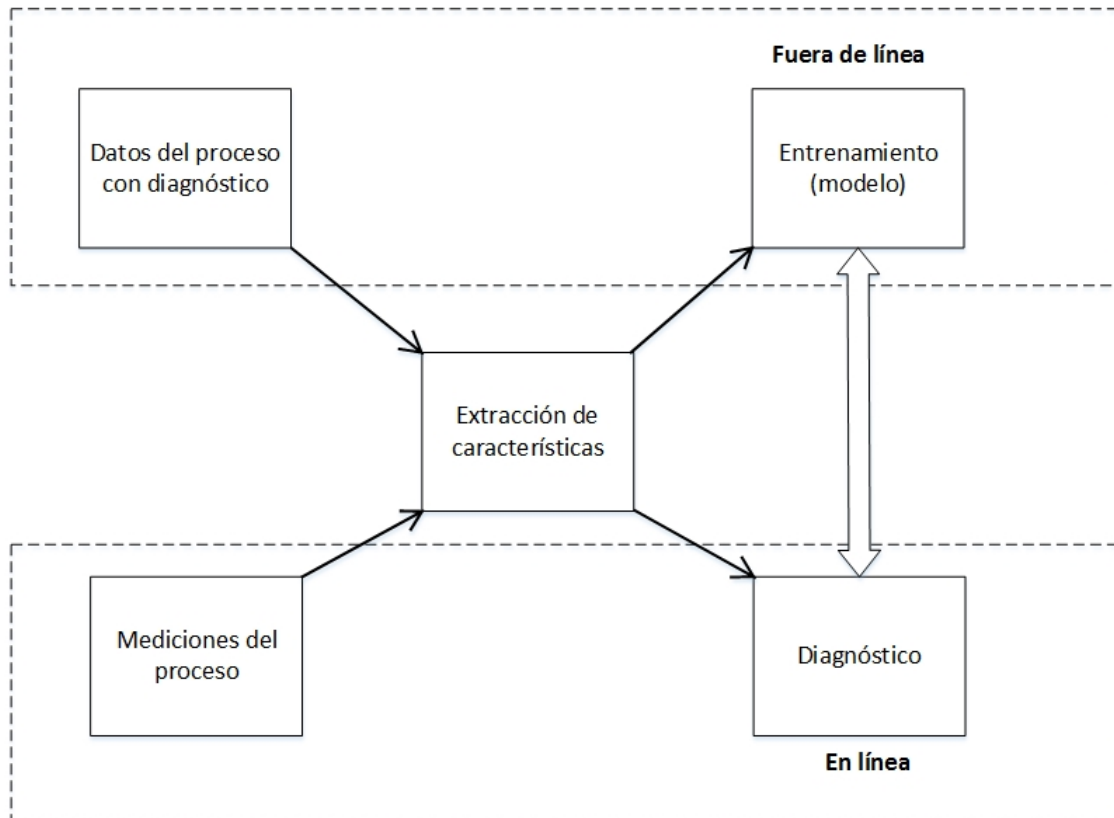


Figura 22: Principio de extracción y evaluación de características de señales.

métodos de procesamiento de señales se incrementan, frecuentemente exponencialmente, con la complejidad de los algoritmos. Sin embargo, el costo de implementación de avanzados métodos de procesamiento han ido desplazándose haciéndose asequibles, generando una tendencia en los últimos años de incrementar el desempeño, conjuntado con una reducción de los costos del hardware para el procesamiento de señales.

Dependiendo del método de utilizado, los algoritmos de procesamiento digital de señales pueden ser categorizados en una, o una combinación de cuatro categorías. Éstas son procesamiento de señales no paramétricas, procesamiento de señales basado en modelos, procesamiento de señales de estadística bayesiana, y procesamiento de señales por redes neuronales.

2.4.1 *Procesamiento de señales no paramétricas*

Los métodos no paramétricos, como el nombre describe, no utiliza un modelo paramétrico de la generación de la señal, o un modelo de distribución estadística de la señal. La señal es procesada como una forma de onda, o una secuencia

de dígitos. Los métodos no paramétricos no están especializados en alguna clase particular de señales, son métodos ampliamente aplicables a cualquier señal, independientemente de las características de la fuente de la señal. El inconveniente de estos métodos, es que no utilizan las características distintivas del proceso de la señal que puedan guiar un mejoramiento del desempeño. Algunos ejemplos de métodos no paramétricos incluyen al filtrado digital y métodos basados en transformaciones de señal como análisis o sintetización de Fourier, o de la transformada discreta coseno.

2.4.2 *Procesamiento de señales basado en modelos*

Éstos métodos emplean un modelo del proceso de generación de la señal. El modelo paramétrico normalmente describe las estructuras predecibles y los patrones esperados en el proceso de la señal, y puede ser usado para transmitir los futuros valores de la señal desde su trayectoria pasada. Los métodos basados en modelos normalmente superan a los métodos no paramétricos, debido a que utilizan mas información en la forma de un modelo de procesamiento. Sin embargo, pueden ser sensibles a desviaciones de la señal. Los métodos paramétricos mas ampliamente usados son los modelos de predicción lineal. Los modelos de predicción lineal han facilitado el desarrollo de avanzados métodos de procesamiento de señales en aplicaciones como codificación de voz de baja transferencia de bits en telefonía celular, codificación digital de vídeo, análisis espectral de alta definición, procesamiento de señales de radar y reconocimiento de voz.

2.4.3 *Procesamiento de señales basado en estadística bayesiana*

Las fluctuaciones de una señal puramente aleatoria, o la distribución de una clase de señales aleatorias en el espacio de señales, no puede ser modelada por una ecuación predictiva, pero puede ser descrita en términos de valores promedio estadísticos, y modelada por una función de distribución probabilista en un espacio multidimensional de señales. Por ejemplo, un modelo de predicción manejado por una señal aleatoria, puede modelar la comprensión acústica de alguna palabra dicha. Sin embargo, la señal aleatoria de entrada del modelo de predicción lineal, o las variaciones de las características de las diferentes realizaciones acústicas de la misma palabra a través de la población parlante, puede ser únicamente descritas en términos estadísticos o en términos de funciones de probabilidad. La teoría de inferencia Bayesiana provee un marco generalizado para el procesamiento estadístico de señales aleatorias, y para formular y estimar resultados de problemas de toma de decisiones.

2.4.4 *Procesamiento en base a redes neuronales*

Las redes neuronales son combinaciones de unidades de procesamiento de simple adaptatividad relativa no lineal, en arreglos que les permiten tener una semejanza estructural para la transmisión y procesamiento de señales en neuronas biológicas. En una red neuronal, varias capas de elementos de procesamiento paralelo, están interconectados en una red de conexión estructurada gerárquicamente. Los pesos de las conexiones están entrenados para desempeñar una función del procesamiento de la señal como una predicción o una clasificación. Las redes neuronales son particularmente útiles en particionamiento no lineal de un espacio de señal, en extracción de características y reconocimiento de patrones, y en sistemas de toma de decisiones. En algunos sistemas de reconocimiento de patrones híbridos, las redes neuronales son usadas para complementar métodos de inferencia Bayesiana.

2.5 MUESTREO Y CONVERSIÓN ANÁLOGO A DIGITAL

Una señal digital es una secuencia de números de valores reales o complejos que representan la fluctuación de la información con el tiempo, espacio, o alguna otra variable. El elemento básico de una señal en tiempo discreto es la unidad de muestreo de la señal $\delta(m)$ definida como:

$$\delta(m) = \begin{cases} 1 & m = 0 \\ 0 & m \neq 0 \end{cases} \quad (3)$$

En donde m es el índice de tiempo discreto. Una señal digital $x(m)$ puede ser expresada como la suma de un número de unidades de muestra de amplitud escalada y tiempo modificado como:

$$x(m) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k)\delta(m - k) \quad (4)$$

La Figura 23 ilustra una señal discretizada en el tiempo. Muchos procesos aleatorios, como voz, música, radar y sonar, generan señales que son continuas en el tiempo y continuas en amplitud. Las señales continuas son llamadas análogas debido a que sus fluctuaciones en el tiempo son análogas a las variaciones de la señal fuente. Para procesos de digitalización, las señales análogas son muestreadas, y cada muestra es convertida en un dígito de n bits. El proceso de digitalización debe ser desarrollado de tal manera que la señal original pueda

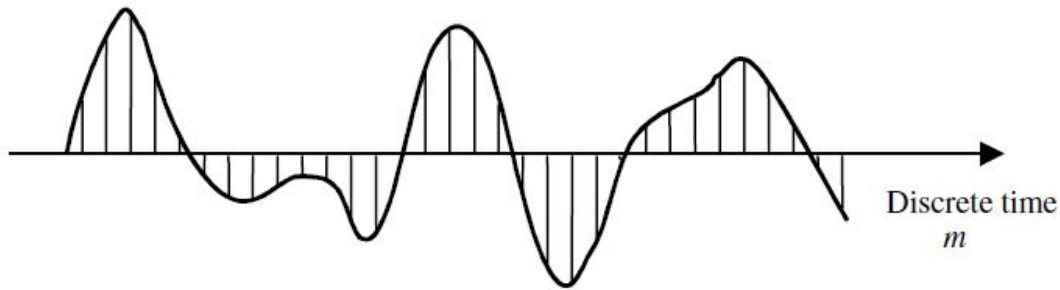


Figura 23: Una señal discreta y su envolvente con variaciones en el tiempo[4].

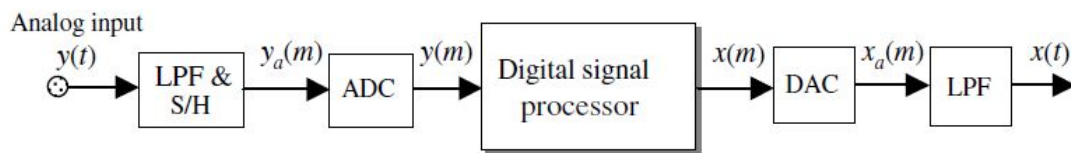


Figura 24: Configuración de un sistema de Procesamiento Digital de Señales[4].

ser recuperada de su versión digital sin pérdida de información, y con tanta fidelidad como requiera la aplicación.

En la Figura 24 se observa una configuración en diagramas de bloques de un Procesador Digital de Señales con una entrada análoga. El filtro pasa bajas remove de la señal las frecuencias de las bandas de acuerdo a un rango preseleccionado. La unidad de muestreo y retención *S/H* (*sample and hold*) periódicamente muestrea la señal para convertirla de tiempo continuo a tiempo discreto. El convertidor análogo a digital (*ADC*) mapea cada muestra de amplitud de la señal continua a un dígito de n bits. Después del procesamiento, la salida digital del procesador puede ser convertida a una señal análoga nuevamente utilizando un convertidor digital a análogo *DAC* y un filtro pasa bajas.

2.6 POTENCIA ESPECTRAL Y SU CORRELACIÓN

La potencia espectral revela la existencia, o ausencia, de patrones repetitivos y sus estructuras de correlación en un proceso de señal. Estos patrones estructurales son importantes en una amplia gama de aplicaciones como transmisión de datos, codificación de señales, detección de señales, sistemas de toma de decisiones, etcétera. El método más común de estimación espectral está basado en la Transformada Rápida de Fourier (FFT). Para muchas aplicaciones, los métodos basados en FFT producen resultados suficientemente buenos. Sin embargo,

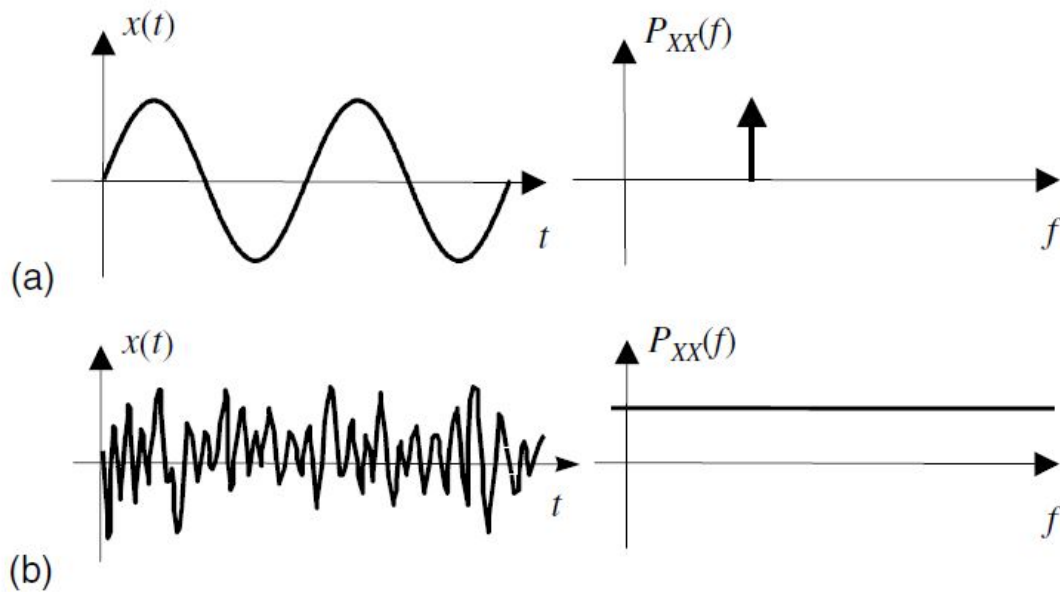


Figura 25: La distribución de potencia en frecuencia indica la correlación o el carácter aleatorio de una señal. a) Una señal predecible. b) Una señal aleatoria.[4]

métodos más avanzados de estimación espectral pueden ofrecer mejor resolución de frecuencia, y menos variaciones. Los métodos clásicos de estimación de potencia espectral están basados en periodogramas.

La potencia espectral de una señal brinda la distribución de la potencia de la señal, a través de varias frecuencias. La potencia espectral es la Transformada Rápida de la función de correlación, y revela información de la estructura correlacional de la señal. La fuerza de la Transformada de Fourier en análisis de señales y reconocimiento de patrones es su habilidad de revelar la estructura espectral que puede ser usada para caracterizar una señal. Esto es ilustrado en la Figura 25 para los 2 casos extremos de una señal sinusoidal y una señal puramente aleatoria. Para una señal periódica, la potencia está concentrada en las frecuencias de las bandas extremadamente estrechas, indicando la existencia de estructura y el carácter predecible de la señal. En el caso de la señal puramente sinusoidal, mostrada en la Figura 25 a), la potencia de la señal está concentrada en una frecuencia. Para una señal puramente aleatoria (ruido blanco), como la mostrada en la Figura 25 b), la potencia de la señal está distribuida de manera igualitaria en el dominio de la frecuencia mostrando no tener una estructura en la señal.

En general, entre más correlacionada o predecible es una señal, más concentrada es su potencia espectral, e inversamente entre más impredecible o aleatoria es una señal, más distribuida es su potencia espectral. Por lo tanto, la potencia

espectral de una señal puede ser usada para deducir la existencia de patrones repetitivos en el proceso de la señal. Tal información es crucial en detección, toma de decisión y problemas de estimación, en un análisis de sistemas.

2.7 MÉTODOS BASADOS EN ANÁLISIS DE FOURIER.

Los métodos clásicos de basados en análisis de Fourier, como series y la integral de Fourier, son usados para señales y sistemas en tiempo continuo, sistemas en los cuales la señal característica, $s(t)$, está definida en todos los valores de t en el continuo $-\infty < t < \infty$. Los métodos mas recientemente desarrollados, incluyendo la Transformada de Tiempo Discreta de Fourier, (DTFT por sus siglas en inglés) y la Transformada Discreta de Fourier (DFT, por sus siglas en ingles), son extensiones de los conceptos básicos de Fourier que aplican a las señales en tiempo discreto. Una señal característica en tiempo discreto, $s[n]$, está definida solamente por los valores de n donde n es un entero en el rango de $-\infty < n < \infty$. Los métodos en tiempo discreto de análisis de Fourier son particularmente útiles como la base del Procesamiento Digital de Señales, porque extienden la teoría básica del análisis de Fourier a las señales en tiempo discreto y guían a muchos algoritmos eficaces que pueden ser directamente implementados en computadoras generales o dispositivos de propósito especial para el Procesamiento Digital de Señales. La relación entre el dominio de tiempo continuo y tiempo discreto está caracterizado por las operaciones de muestreo y reconstrucción. Si $s_a(t)$ denota una señal $s(t)$ que fue uniformemente muestreada cada T segundos, entonces la representación matemática de $s_a(t)$ esta dada por

$$s_a(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} s(t)\delta(t-nT) \quad (5)$$

en donde $\delta(t)$ es una función impulso continua en el tiempo definida para ser cero para cualquier $t \neq 0$, e indefinida para $t=0$, y tiene un área unitaria cuando se integra de $t=0$ a $t=+\infty$. Debido a que los únicos lugares en los cuales el producto $s(t)\delta(t-nT)$ no es igual a cero son las instancias de muestreo, $s(t)$ en la ecuación 5 puede ser reemplazada con $s(nT)$ sin cambiar el sentido de la expresión. Por lo tanto, una expresión alternativa para $s_a(t)$ que es útil frecuentemente en el análisis de Fourier, está dado por:

$$s_a(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} s(nT)\delta(t-nT) \quad (6)$$

El modelo de muestreo de tiempo continuo $s_a(t)$ consiste en una secuencia de funciones impulso de tiempo continuo, uniformemente espaciados en intervalos de T segundos, y escalados por los valores de la señal $s(t)$ en los instantes de muestreo, como se ilustra en la figura 5. Note que $s_a(t)$ no está definida en los instantes de muestreo porque la función impulso en tiempo continuo por si misma no esta definida en $t=0$. De tal forma, los valores de $s(t)$ en los instantes de muestreo están incrustados como el área bajo la curva de $s_a(t)$, y como tal representa un modelo matemático útil del proceso de muestreo. En el dominio de tiempo discreto el modelo de muestreo es simplemente la secuencia definida por tomar los valores de $s(t)$ en los instantes de muestreo

$$s[n] = s(t)|_{t=nT} \quad (7)$$

2.8 TRANSFORMADA DISCRETA DE FOURIER (DFT)

La DFT (*Discrete Fourier Transform*), convierte una secuencia en el dominio del tiempo en su secuencia equivalente en dominio de frecuencia. La DFT inversa realiza la operación contraria transformando una secuencia en dominio de la frecuencia a una secuencia en dominio del tiempo. Para una señal $x(m)$ discreta en el tiempo de longitud de N muestras de duración finita, la DFT está definida como N muestras espaciadas uniformemente en el tiempo

$$X(k) = \sum_{m=0}^{N-1} x(m)e^{-j(2\pi/N)mk}, \quad k = 0, \dots, N-1 \quad (8)$$

Y la Transformada Discreta Inversa de Fourier (IDFT) está dada por

$$x(m) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k)e^{j(2\pi/N)mk}, \quad m = 0, \dots, N-1 \quad (9)$$

Independientemente de si $x[m]$ es una longitud finita de una secuencia periódica, la DFT trata las N muestras de $x[m]$ como si fueran un periodo de una secuencia periódica. Ésta es una importante característica de la DFT, y una de las propiedades más manejables en el procesamiento de señales. De la ecuación 8, el calculo directo de la trasformada requiere $N(N-1)$ multiplicaciones y un similar número de sumas, reflejando la complejidad y tiempo requerido para implementar un algoritmo en algún sistema embebido. En base a ésta complejidad, se desarrollaron métodos para reducir el código y tiempo requerido para el procesamiento de la DFT, éstos métodos son conocidos como métodos de Transformada Rápida de Fourier (FFT). Los métodos FFT utilizan las propiedades de periodicidad y simetría de $e^{-j(2\pi/N)}$ para reducir los cálculos redundantes.

2.9 TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER (FFT)

La FFT es uno de los métodos más comúnmente utilizados en DSP para proveer un análisis espectral de la frecuencia. Dos diferentes procedimientos son utilizados para desarrollar una FFT: La separación en frecuencia y la separación en tiempo. Muchas variantes de la FFT han sido usadas, como la Transformada Winograd, la Transformada Discreta Coseno (DCT) y la Transformada Discreta Hartley. Los métodos más ampliamente usados, tanto de separación en tiempo como de frecuencia, son los algoritmos que emplean radix-2 (base 2).

Es importante considerar que la FFT no es una Transformada de Fourier como tal, sino un algoritmo computacional eficiente que reduce la complejidad del computo de la DFT del orden N^2 al orden $N \log_2 N$. Cuando N es grande, los ahorros computacionales que provee la FFT es tan grande que puede proveer análisis en tiempo real en aquellas aplicaciones que serían imposible con la DFT.

2.9.1 Desarrollo de algoritmo para FFT con radix-2

La DFT de una señal discreta en el tiempo $x(nT)$ es

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} X(n)W^{nk} \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (10)$$

Donde el periodo de muestreo T está implícito en $x(n)$ y N es el número de muestras. Las constantes W son conocidas como constantes de giro o factores, las cuales representan la fase

$$W = e^{-j2\pi/N} \quad (11)$$

Y están en función de la longitud N . La ecuación 10 puede ser escrita para $k=0,1,\dots,N-1$, como

$$X(k) = x(0) + x(1)W^k + x(2)W^{2k} + \dots + x(N-1)W^{(N-1)k} \quad (12)$$

Esto representa una matriz de $N \times N$ términos, dado que $X(k)$ necesita ser calculada para N valores de k . Dado que 12 es una ecuación en términos de una exponencial compleja, para una específica k hay $(N-1)$ sumas complejas y N multiplicaciones complejas. Ésto resulta en un total de $N^2 - N$ sumas complejas y N^2 multiplicaciones complejas. La FFT reduce la complejidad computacional de N^2 a $N \log_2 N$ como ya se menciona.

El algoritmo de la FFT toma ventaja de la periodicidad y simetría de los factores para reducir los requerimientos computacionales de la DFT. De la periodicidad de W ,

$$W^{k+N} = W^k \quad (13)$$

y de la simetría de W ,

$$W^{k+N/2} = -W^k \quad (14)$$

La Figura 26 ilustra las propiedades de las constantes de giro o factores W para $N = 8$. Por ejemplo, si $k = 2$ de la ecuación 13, $W^{10} = W^2$, y de la ecuación 14, $W^6 = -W^2$. Para un radix-2 (base 2), la FFT descompone la DFT de N puntos en dos DFT de $(N/2)$ puntos. Cada DFT de $(N/2)$ puntos es posteriormente descompuesta en dos DFT de $(N/4)$ puntos, y así sucesivamente. La última descomposición consiste en una DFT de $(N/2)$ puntos. La Transformada mas pequeña es determinada por la base de la FFT. Para un radix-2, N debe ser una potencia de 2, y la Transformada mas pequeña o la última descomposición es la DFT de 2 puntos. Para una base 4, la última descomposición es una DFT de 4 puntos.

2.9.2 Algoritmo de separación en frecuencia para FFT con base 2

Considere una entrada $x(n)$ de dominio en el tiempo dividida en dos partes:

$$a) \quad x(0), x(1), \dots, x\left(\frac{N}{2} - 1\right) \quad (15)$$

y

$$b) \quad x\left(\frac{N}{2}\right), x\left(\frac{N}{2} + 1\right), \dots, x(N - 1) \quad (16)$$

Tomando la DFT de cada parte de la secuencia 15 y 16 se tiene

$$X(k) = \sum_{n=0}^{(N/2)-1} x(n)W^{nk} + \sum_{n=\frac{N}{2}}^{N-1} x(n)W^{nk} \quad (17)$$

Si $n = n + N/2$ en la segunda sumatoria de 17, $X(k)$ será

$$X(k) = \sum_{n=0}^{(N/2)-1} x(n)W^{nk} + W^{kN/2} \sum_{n=0}^{(N/2)-1} x\left(n + \frac{N}{2}\right) W^{nk} \quad (18)$$

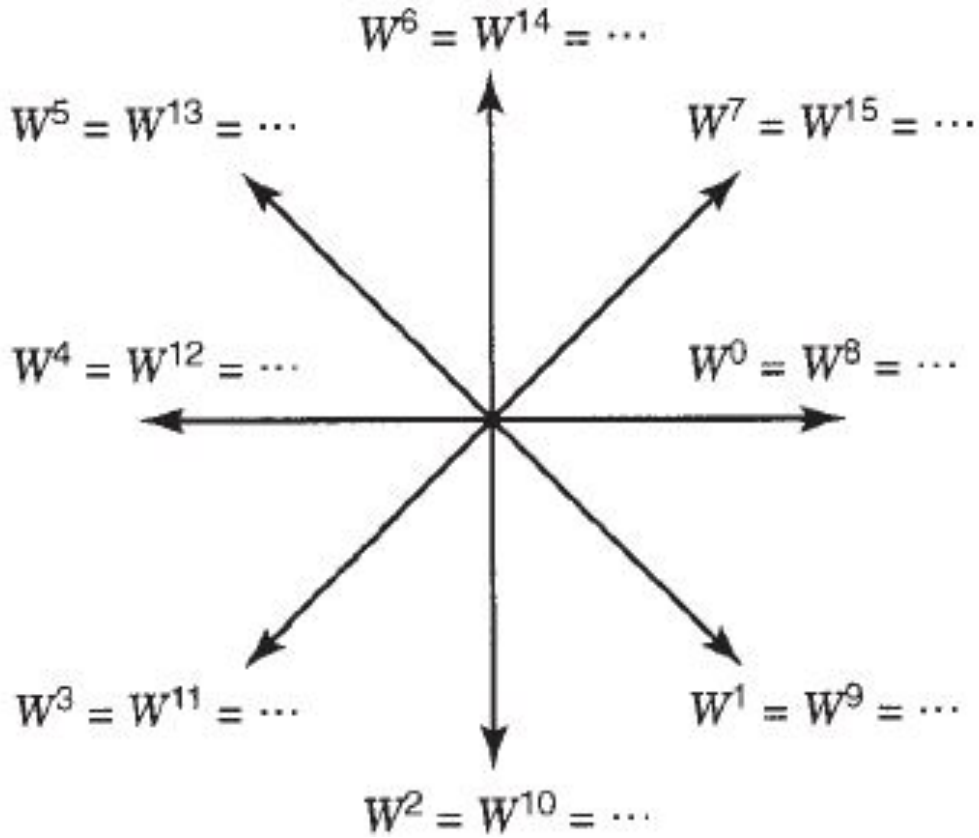


Figura 26: Periodicidad y simetría de las constantes de giro o Factores W . [5]

En donde $W^{kN/2}$ no es considerada en la segunda sumatoria por no ser una función de n .

Usando

$$W^{kN/2} = e^{-jk\pi} = (e^{-j\pi})^k = (\cos \pi - j \sin \pi)^k = (-1)^k$$

Entonces 18 se convierte en

$$X(k) = \sum_{n=0}^{(N/2)-1} \left[x(n) + (-1)^k x\left(n + \frac{N}{2}\right) \right] W^{nk} \tag{19}$$

Debido a que $(-1)^k = 1$ para una k par y es -1 para una k impar, la ecuación 19 puede ser separada para el caso de que k sea par o sea impar

1. Para k par:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{(N/2)-1} \left[x(n) + x\left(n + \frac{N}{2}\right) \right] W^{nk} \tag{20}$$

2. Para k impar:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{(N/2)-1} \left[x(n) - x\left(n + \frac{N}{2}\right) \right] W^{nk} \quad (21)$$

Sustituyendo $k = 2k$ para las k pares, y $k = 2k + 1$ para las k impares en las ecuaciones 20 y 21, pueden ser escritas para $k = 0, 1, \dots, (N/2) - 1$ como

$$X(2k) = \sum_{n=0}^{(N/2)-1} \left[x(n) + x\left(n + \frac{N}{2}\right) \right] W^{2nk} \quad (22)$$

$$X(2k + 1) = \sum_{n=0}^{(N/2)-1} \left[x(n) - x\left(n + \frac{N}{2}\right) \right] W^n W^{2nk} \quad (23)$$

Debido a que los factores o constantes de giro W están en función de la longitud de N , pueden ser representadas como W_N . Entonces W_N^2 puede ser escrita como $W_{N/2}$. Si

$$a(n) = x(n) + x(n + N/2) \quad (24)$$

$$b(n) = x(n) - x(n + N/2) \quad (25)$$

Entonces las ecuaciones 22 y 23 pueden ser escritas mas claramente como dos DFT de $(N/2)$ puntos, o

$$X(2k) = \sum_{n=0}^{(N/2)-1} a(n) W_{N/2}^{nk} \quad (26)$$

$$X(2k + 1) = \sum_{n=0}^{(N/2)-1} b(n) W_N^n W_{N/2}^{nk} \quad (27)$$

La descomposición de una DFT de N puntos, a 2 DFT de $(N/2)$ puntos se muestra en la Figura 27 para una $N=8$. Como resultado del proceso de descomposición, las X par se encuentran en la mitad superior de la figura, y las X impares en la mitad inferior.

La representación gráfica del flujo del algoritmo para el cálculo de la FFT de $N=8$, es ilustrada en la Figura 28. Éste algoritmo es conocido como *mariposa* y es de descomposición en frecuencia, debido a que la secuencia de salida $X(k)$ se descompuesta en subsecuencias mas pequeña, y éste proceso continua a través de M etapas o iteraciones, en donde $N = 2^M$.

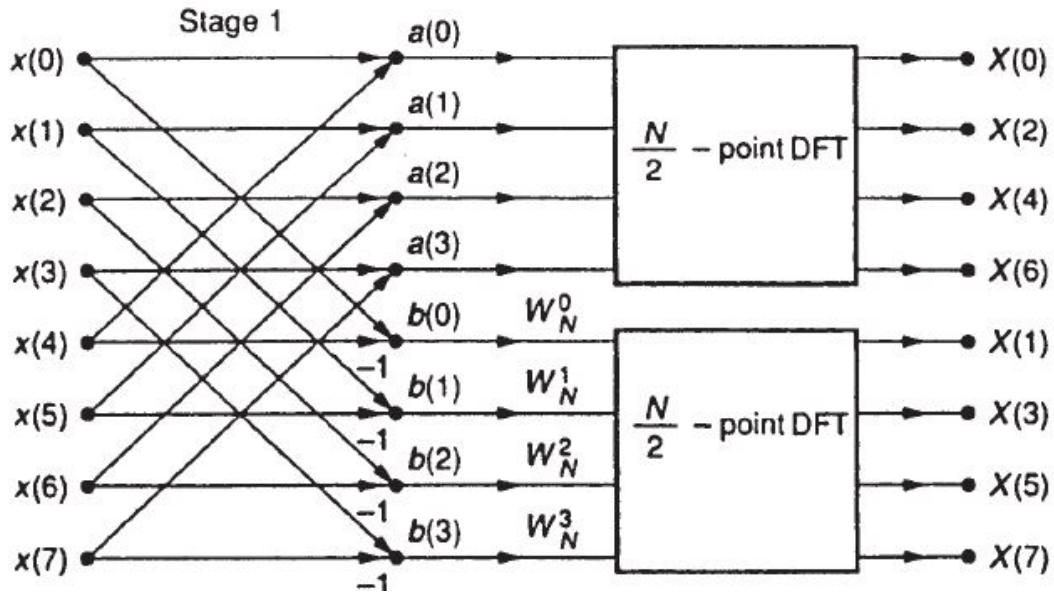


Figura 27: Descomposición de una DFT de N puntos en 2 DFT de N/2 puntos, para una N=8.[5]

2.10 FUNDAMENTOS DE SONIDO

2.10.1 La física del sonido

El sonido puede considerarse como una versión aerotransportada de la vibración. El aire que transporta el sonido es una mezcla de gases. En los gases, las

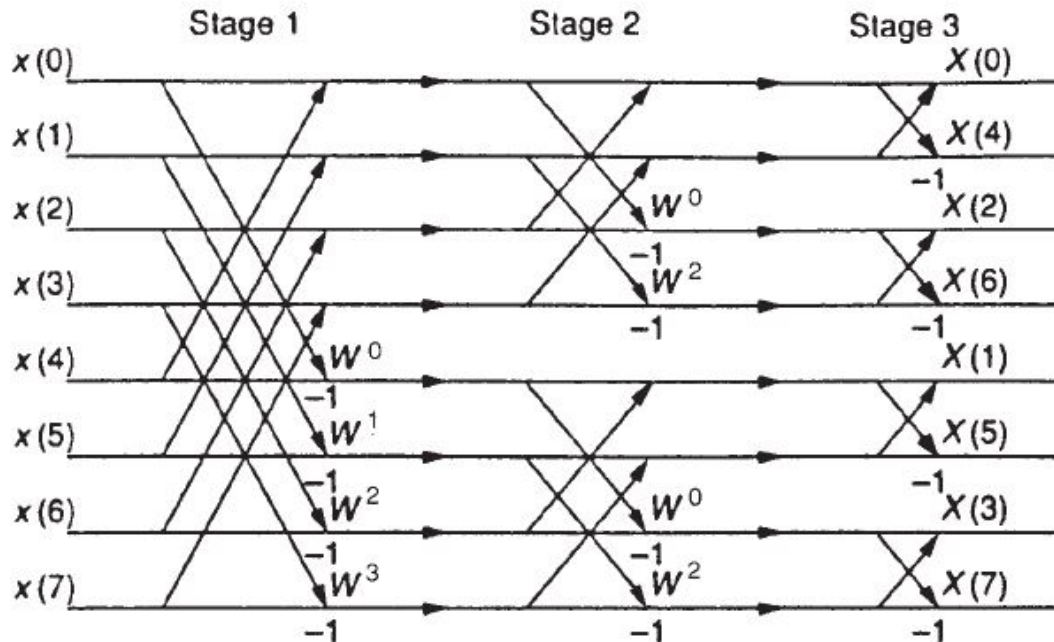


Figura 28: Gráfica del flujo de una FFT de 8 puntos usando DIF.[5]

moléculas contienen demasiada energía que pueden vencer fácilmente sus fronteras, y traspasarlas a gran velocidad. Si se considera un objeto que recibe el movimiento de un gas impulsado por una fuente de sonido, el efecto será innumerables colisiones de moléculas impactando a gran velocidad en contra de sus paredes, produciendo presión sobre esas paredes en cada impacto. La Figura 29, parte a, ilustra las colisiones de moléculas en contra de dicho objeto, si la temperatura es constante, la presión será constante.

Si como en el caso de la Figura 29 sección b, se tiene un objeto sólido en movimiento en contra de la trayectoria de las moléculas de un gas presurizado, el resultado será una colisión que tendrá un rebote que incrementa la velocidad de las moléculas. En caso contrario, como en la sección c de la Figura 29, el objeto tiene una trayectoria en la misma dirección que el movimiento de las partículas del gas, entonces las moléculas al rebotar disminuyen su velocidad.

La velocidad promedio y el desplazamiento de todas las moléculas en una capa de aire cerca de un cuerpo en movimiento es la misma que la velocidad y el desplazamiento del cuerpo. El movimiento del cuerpo resulta en un incremento o un decremento local en presión. Así, el sonido es ambas cosas, una perturbación en presión y velocidad.

Debido al hecho de que un gas contiene infinidad de moléculas en colisión, una pequeña masa o partícula de gas puede tener características estables debido a que las moléculas que dejan al gas, son reemplazadas con nuevas con iguales características. Como resultado, la acústica raramente tiene que considerar la estructura molecular del aire y el constante movimiento puede ser despreciado. De tal manera que cuando la velocidad y desplazamiento de las partículas son considerados, se hace en referencia a valores promedio de grandes cantidades de moléculas. En un contenedor de gas en reposo, la velocidad de las partículas

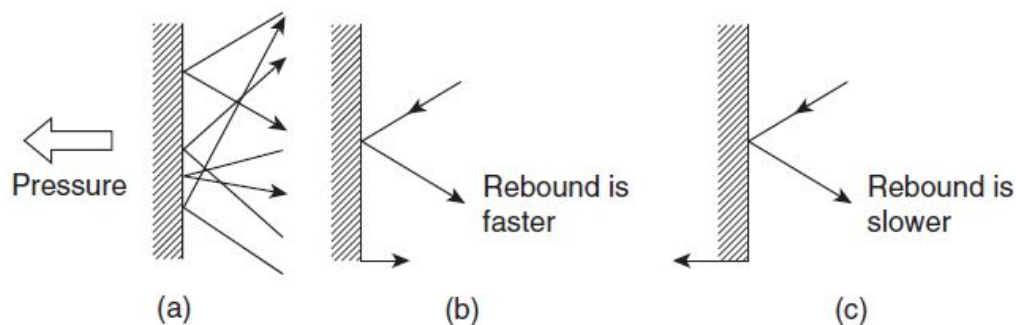


Figura 29: a) Presión ejercida por las moléculas de gas al chocar con la pared. b) La velocidad de las moléculas es más rápida al rebotar si la pared se mueve en su contra. c) La velocidad del rebote de las partículas disminuye si la pared se desplaza en el sentido de la trayectoria del gas.[6]

y su desplazamiento, será cero en cualquier parte del contenedor. Sin obstáculos, el sonido viaja libremente en el aire. La velocidad del sonido es proporcional a la raíz cuadrada de la temperatura absoluta. En la tierra, los cambios de temperatura con respecto al cero absoluto (-273°C) también incrementarían alrededor del 1%, excepto en lugares extremadamente inhóspitos. La velocidad del sonido, casi en todo el mundo, es de 344 metros por segundo.

2.10.2 Longitud de onda

El sonido puede ser causado por algún acontecimiento aislado como una percusión, o por un evento periódico como la vibración sinusoidal como la vibración de un diapasón. El sonido generado por la percusión, es conocido como transitorio, mientras que el estímulo periódico produce un sonido en estado estable que posee una frecuencia f .

Debido a que el sonido viaja a una velocidad finita, el observador fijo a cierta distancia de la fuente experimentará la perturbación en un tiempo posterior. En el caso del sonido transitorio causado por un impacto, el observador detectará una réplica única de la original que pasará a la velocidad del sonido. En el caso del diapasón, una fuente de sonido periódica, la presión incrementa y decrecienta alejándose de la fuente a la velocidad del sonido. Para una tasa dada de vibración de la fuente, un pico dado se propagará a una distancia constante antes de que el otro pico ocurra, la distancia de estos picos es llamada longitud de onda λ . La figura [Figura 30](#) muestra que la longitud de onda (wavelength) es definida como la distancia de dos puntos idénticos en el ciclo completo. Si la fuente vibra más rápido, picos sucesivos se irán acercando entre ellos y la longitud de onda será más corta. La figura [Figura 21](#), también muestra que la longitud de onda es inversamente proporcional a la frecuencia. Por ejemplo, es fácil recordar que la longitud de onda de una frecuencia de 1kHz es de 30 cm. aproximadamente.

2.10.3 Señales periódicas y no periódicas

El sonido puede ser dividido en estas dos categorías: periódico y no periódico, y puede ser analizado en el dominio del tiempo donde la forma de onda es considerada, o en el dominio de la frecuencia en donde el espectro es considerada. Los dominios del tiempo y la frecuencia están conectados por transformadas de las cuales la mejor conocida es la Transformada de Fourier.

En la figura [Figura 31](#) se observan tres ejemplos de señales periódicas y no periódicas. La sección a), muestra que una señal ideal periódica es aquella que se repite después de transcurrida una constante de tiempo y lo hace de ma-

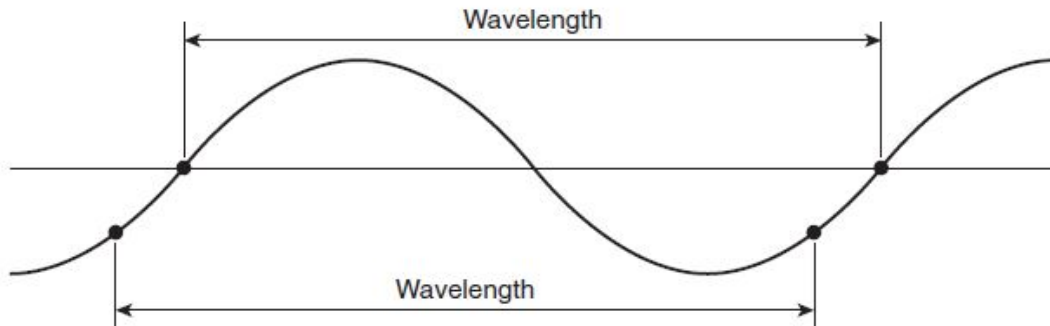


Figura 30: Longitud de onda (wavelength) de una señal periódica senoidal[6].

nera indefinida. En el dominio de la frecuencia, dicha señal será representada por una frecuencia fundamental y una serie de armónicos que son múltiplos enteros de la fundamental. El timbre de un instrumento por la estructura armónica. Donde no hay armónicos, la señal más simple posible tendría una sola frecuencia de espectro. En el dominio del tiempo, sería una señal seno infinita.

La sección b) de la figura Figura 31, Muestra una señal no periódica conocida como ruido blanco. Su espectro muestra que es igual en nivel en todas las frecuencias, de aquí adquiere el término blanco, que es análogo a la luz blanca que contiene todas las longitudes de onda. La sección c), muestra un transitorio o impulso que también es una señal no periódica, el análisis espectral del transitorio contiene un rango de frecuencias, pero estos no son armónicos al no ser múltiplos enteros de la frecuencia más baja.

2.10.4 Espectro audible

El espectro audible o campo tonal, está conformado por todas las frecuencias que el oído humano puede percibir. Aunque todas las personas tienen un rango diferente de audición, el espectro audible se ha estandarizado entre los 20 Hz y los 20,000 Hz si el oído es sano. También se ha comprobado que con el paso de la edad la audición se va degradando perdiendo capacidad de responder a ciertas frecuencias, lo que es conocido como presbiacusia.

A su vez, el espectro audible es subdividido en 3 categorías, de acuerdo al tono; bajos, medios y agudos.

- Bajos: Su rango se considera alrededor de los 20 y los 400 Hz, aproximadamente.
- Medios: Su rango se considera alrededor de los 20 a los 2,000 Hz.

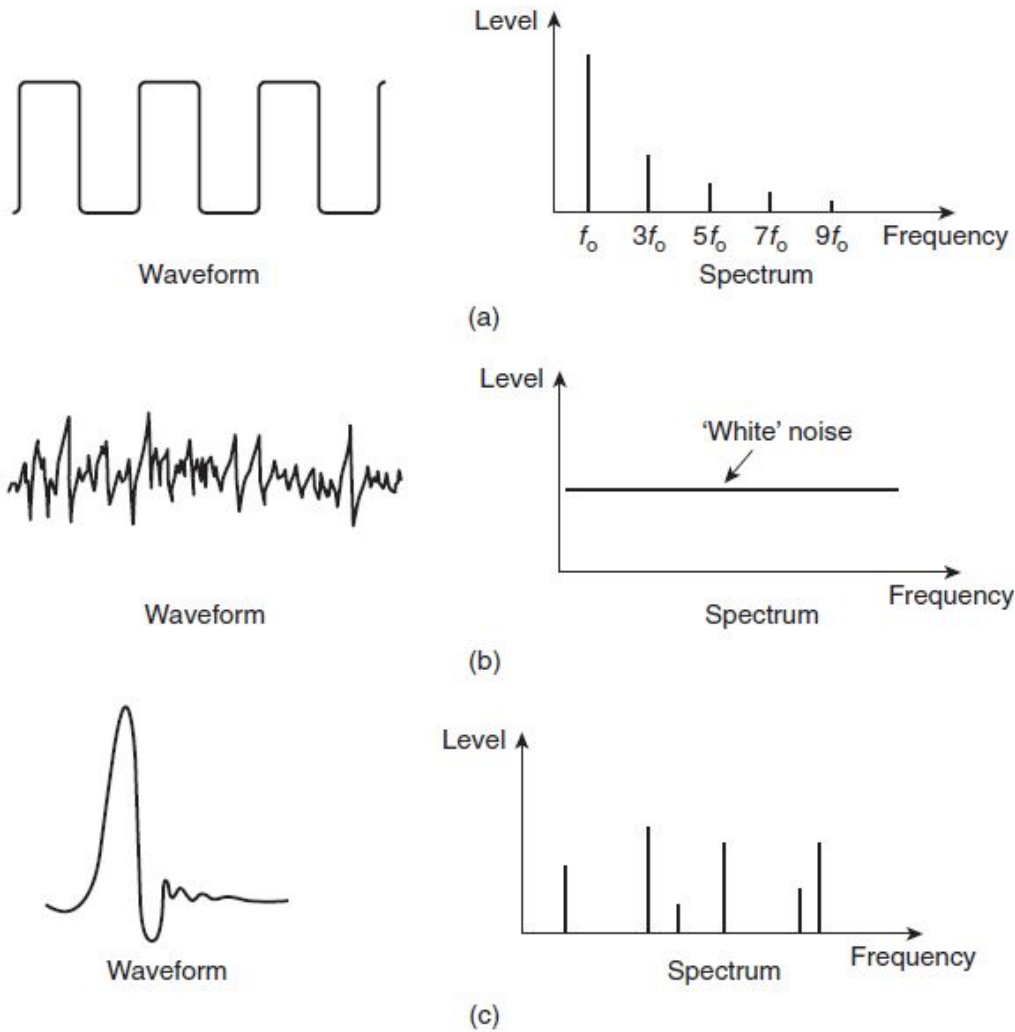


Figura 31: Señales periódicas y no periódicas.[6].

- Agudos: Van de los 2,000 a los 20,000 Hz.

Se observa que el rango de frecuencias que el humano puede percibir es muy amplio, y también se considera que esta comprendido por 10 octavas (algunos consideran 11) sin interrupción. Una octava es considerada el doble del tono o frecuencia. El término de octava se toma de la escala musical, en donde una escala diatónica esta constituida por 8 notas o semitonos. Por ejemplo: si comenzamos con una nota como DO, la octava completa será: DO-RE-MI-FA-SOL-LA-SI-DO. Si el primer LA estaba afinado en 440 Hz el segundo LA (octava siguiente) estará en 880 Hz.

2.10.5 Nivel de presión sonora y sonoridad

En su mejor estado, el oído puede detectar una variación de presión acústica de 2×10^{-5} Pascales rms, y esta presión es usada para referenciar como es medido el nivel de presión sonora *SPL* (*Sound Pressure Level*). La sensación de volumen es una función logarítmica de la SPL; consecuentemente, una unidad logarítmica, el decibel, fue adoptado para la medición del audio.

El rango dinámico de SPL del oído excede los 130 dB, pero en los extremos de éste rango el oído está ya imposibilitado de escuchar, o bien sufre dolor. La respuesta en frecuencia del oído no es lineal y también cambia de acuerdo a la presión sonora. La respuesta subjetiva del nivel es llamada sonoridad, y se mide en fonios o fons. La escala del fon está definida para coincidir con la escala de SPL en 1kHz, pero a otras frecuencias la escala del fon se desvía porque muestra la actual presión sonora juzgada por un humano para igualarla a la escala de 1kHz, si la frecuencia es de tono bajo, el oído humano la percibe como si tuviera menor presión sonora, en caso contrario, si la frecuencia es de tono alto, el oído humano creerá que la SPL es mayor.

La Figura 32, muestra la gráfica de curvas de igual sonoridad o curvas isofónicas, las cuales fueron medidas originalmente por Fletcher and Munson y subsecuentemente por Robinson and Dadson.

En estas curvas isofónicas se observa como, a medida que aumenta la intensidad sonora, las curvas se hacen cada vez más planas. Esto se traduce en que la dependencia de la frecuencia es menor a medida que aumenta el nivel de presión sonora, lo que significa que si disminuye la intensidad sonora los primeros sonidos en desaparecer serían los graves (bajas frecuencias).

Así, si 0 fon corresponden a una sonoridad con una intensidad de 0 dB con una frecuencia de 1 kHz, también una sonoridad de 0 fon podría corresponder a una sonoridad con una intensidad de 60 dB con una frecuencia de 40 Hz.

2.10.6 El decibel

Las primeras señales de audio que fueron transmitidas se hicieron sobre las líneas telefónicas. En estas líneas, el cable era demasiado largo, comparado con la longitud de onda eléctrica (no confundir con la longitud de onda acústico) de la señal, en las líneas de transmisión las inductancias en serie y capacitancias en paralelo interactúan dándole a la línea características de impedancia. En telefonía, dicha impedancia se ubica arriba de los 600 ohms. En las líneas de transmisión la mejor entrega de potencia sucede cuando la fuente y la carga poseen la misma impedancia.

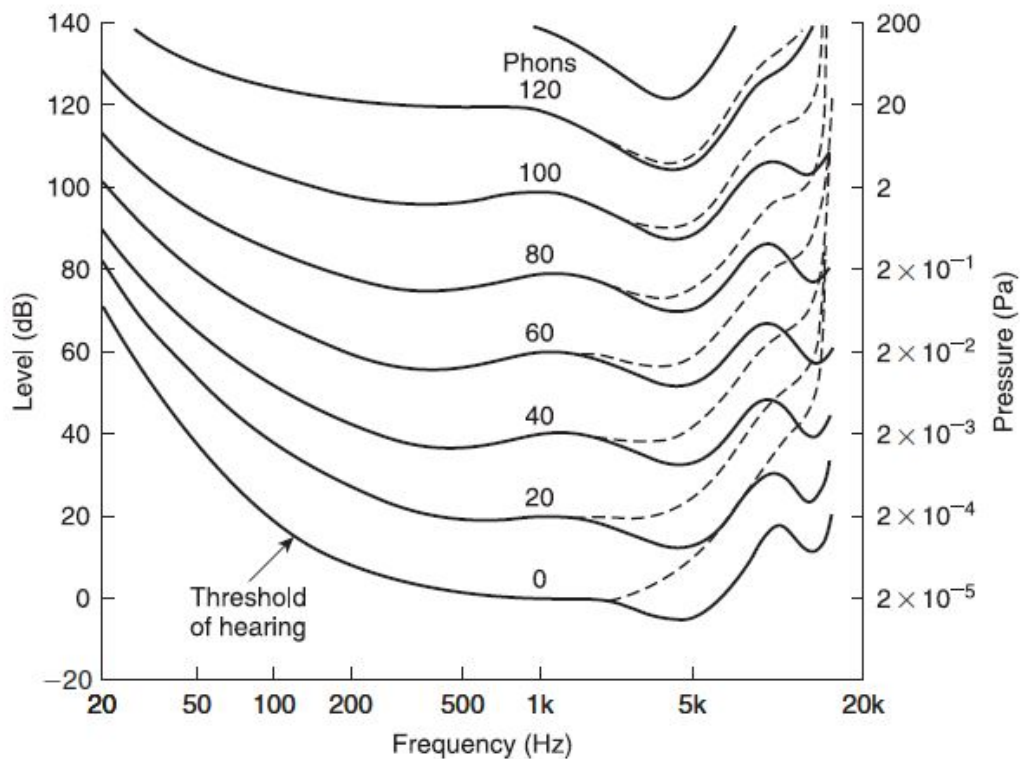


Figura 32: Curvas isofónicas de la percepción acústica.[6].

Era frecuentemente requerido medir la potencia en un sistema de telefonía, y 1 mW fue escogido como la unidad adecuada, esto debido a que la referencia con la cual las señales podían ser comparadas era la disipación de 1mW en 600 ohms.

El decibel es un sistema de medición logarítmico que tiene su origen en la telefonía, en donde la pérdida del cable es una función logarítmica de la longitud. El oído humano también tiene una respuesta logarítmica con respecto a la presión del sonido. Para relacionar la subjetiva respuesta, la medida de nivel de señal de audio también tuvo que ser logarítmica, y por lo tanto el decibel fue adoptado para el audio.

La unidad logarítmica de medición en telefonía fue llamada *Bel*, dado que Alexander Graham Bel fue el inventor de la telefonía. El Bel fue definido como el logaritmo de la razón de la potencia medida, respecto a una potencia de referencia. Pero el *Bel* resultó excesivamente grande para propósitos prácticos, por lo que se decidió dividir entre 10 obteniéndose decibeles, y abreviándose dB.

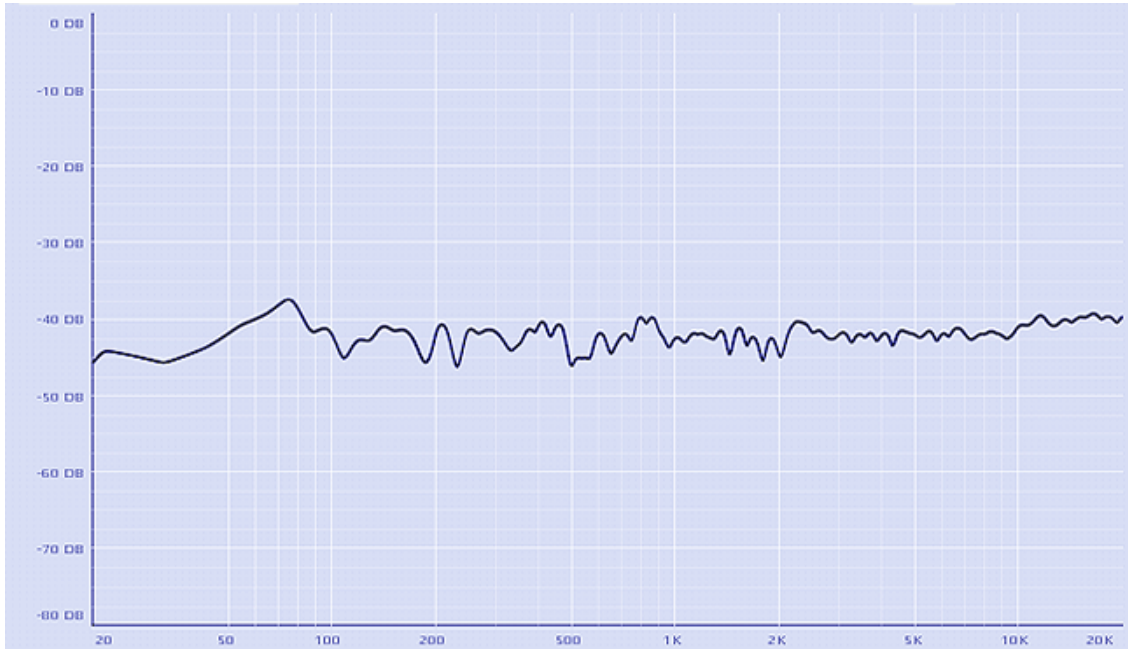


Figura 33: Gráfica espectral del ruido blanco.

2.10.7 Ruido blanco

El ruido blanco es una señal de origen aleatorio (proceso estocástico) caracterizado por no guardar correlación estadística para los valores que toma la señal entre dos tiempos diferentes. A consecuencia de esta característica la Densidad de Potencia Espectral es una constante, por lo cual la potencia en el espectro de frecuencia es la misma en todas las bandas.

El ruido blanco es una señal no correlativa, es decir, en el eje del tiempo la señal toma valores sin ninguna relación unos con otros. Cuando se dice que tiene una densidad espectral de potencia plana, con un ancho de banda teóricamente infinito, es que en un gráfica espectral de frecuencia tras haber realizado una descomposición espectral de Fourier, en el dominio de la frecuencia veríamos todas los componentes con la misma amplitud, haciendo el efecto de una línea continua paralela al eje horizontal.

La Figura 33 presenta la gráfica del ruido blanco visto desde un analizador de espectro.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] UNESCO, "Estadísticas de la unesco," 2011.
- [2] Y. Kapellner-Rabinovitz, "Digital light processing technology (dlp) beyond any conventional projection."
- [3] R. M.-M. Cristina Verde, Sylviane Gentil, *Monitoreo y Diagnóstico Automático de Fallas en sistema dinámicos*. Instituto de Ingeniería UNAM, 2013.
- [4] S. V. Vaseghi, *Advanced Digital Signal and Noise Reduction*. John Wiley and Sons Ltd, 2000.
- [5] R. Chassaing, *Digital Signal Processing and Applications with the C6713 and C6416 DSK*. WILEY-INTERSCIENCE, 2005.
- [6] B. D.-J. L. H. I. S. A. S. D. D. E. P. Douglas Self, Richard Brice and J. Watkinson, *Audio Engineering*. Newnes,Elsevier, 2009.
- [7] DOLBY, *DOLBYCP650*. DOLBY. Installation Manual.
- [8] C. Todd, "Loudness uniformity and dinamyc range control for digital multichannel audio broadcasting," *Conference Publication No. 413 IEEE1995, International Broadcasting Convention, 1995*.
- [9] T. Instruments, *AIC23 codec*. Texas Instruments, March 2004.
- [10] S. Digital, *Manual Tecnico DSK6713*. Spectrum Digital, 2003.
- [11] Audiocontrol, "Cm-10 replacement microphone."
- [12] Dreamworks, "Annual report pursuant to section 13 or 15(d) of the securities exchange act of 1934," tech. rep., Dreamworks, 2004.
- [13] IMAX, "Annual report pursuant to section 13 or 15(d) of the securities exchange act of 1934 for the fiscal year ended december 31, 2014," tech. rep., IMAX, 2014.
- [14] Barco, "Annual report 2014," tech. rep., Barco, 2014.
- [15] H. Salazar, "En México, industria de cine vale oro," Enero 2013.

- [16] M. P. A. of America, "Theatrical market statics," tech. rep., Motion Picture Asociation of America, 2013.
- [17] Z. R. Tamayo, "Alejandro ramírez: el showman de los 1,000 mdd," Enero 2014.
- [18] S. Morgan, "10 things movie theaters won't tell you," Diciembre 2009.
- [19] Forbes, "Los 10 países con más boletos vendidos," July 2013.
- [20] CEA, "Annual report 2013," tech. rep., Cinema Exhibitor's Association, 2013.
- [21] I. de Estadística de la UNESCO, "Mercados emergentes y la digitalización de la industria cinematográfica," tech. rep., UNESCO, 2013.
- [22] J. A. R. Maz, "Museo de cine mexicano," 2000.
- [23] I. L. Sánchez, "Mantenimiento preventivo y correctivo de equipo cinematográfico para la empresa cinepolis." Memoria de Residencias Profesionales para obtener el grado de Ingeniero.
- [24] J. J. D. López, "La técnica del sónido cinematográfico," tech. rep.
- [25] T. Instruments, "History of innovations with ti dlp products."
- [26] E. distribution organization, "Digital cinema figures," tech. rep., Europa distribution organization, 2006.
- [27] X.-S. W. K. Z. K. W. P. Y. W.-D. C. H.-H. S. Zhen-Song Wang, Ling Li, "A digital cinema playback system compliant with the dci specification," 2005.
- [28] K. L.-H. K. S. K. I. S. G. S. U.-S. K. D. i. Taehyum Kim, Dongho Won, "Automated dci compliance test system for digital cinema entities," 2007.
- [29] J. A. Bloom, "Digital cinema content security and the dci," *IEEE*, 2006.
- [30] Doremi. Doremi. Brochure TMS Manual Doremi.
- [31] GDC, "Theater managment system."
- [32] Christie, "Theater managment system."
- [33] Barco. Barco. Cine care services bruchure.
- [34] Christie. Christie. Manual Brochure NOC.

- [35] MIT. MEDIA ILLUMINATION TECHNOLOGIES. Brochure Manual NOC.
- [36] IMAX, "Sound."
- [37] IBM, "Caso de Éxito cinepolis con la solución de ibm tivoli." Youtube, 2011.
- [38] rmunindrapandey, "Big cinemas customer satisfaction survey 2010," Abril 2010.
- [39] A. Vincent, "Secret cinema cancellation: ticketholders complain of lost time and money," julio 2014.
- [40] L. J. G. Cova, "Bolívar, el hombre de las dificultades, podría alcanzar unos 30 mil espectadores en su primera semana," Agosto 2013.
- [41] P. McClintock, "Movie theater on 'interstellar' sound complaints," November 2014.
- [42] Redacción, "Suspenden funciones en cine ducal por un desperfecto técnico," Marzo 2014.
- [43] P. hoy, "Suspenden la proyección de películas en cinépolis por problemas técnicos.," Noviembre 2012.
- [44] BBB, "Teatros."
- [45] A. civil al consumidor, "Testimonios," Enero 2012.
- [46] Publico, "Consumer complains forum."
- [47] PROFECO, "Revista del consumidor no.288," tech. rep., 2001.
- [48] I. Allen, "A short primer on the levels of features, trailers and commercials as heard in the cinema," tech. rep., SVP Dolby Laboratories, TASA, 2009.
- [49] *The TASA standard*, 2015.
- [50] D. B. Sally Hernandez, Devin Walker, "Dangerously loud? monitoring movie theater volume," Febrero 2014.
- [51] P. Zimonjic, "Deafening new films threaten hearing of young cinema goers," Octubre 2004.
- [52] E. A. L. Melanie A Ferguson, Adrian C Davis, "Cinemas - do they pose a risk to hearing?," 2000.

- [53] AUDIOCONTROL, *AUDIOCONTROL RTA SA-3052 SPECIFICATIONS*. AUDIOCONTROL.
- [54] Audiocontrol, *AC-10 MICROPHONE*. Audiocontrol.
- [55] J. F. ALLEN, "The mythical "x-curve," *BOXOFFICE MAGAZINE*, 2001.
- [56] M. Karagosian, "The x curve, is not an equalization curve," 2013.
- [57] JBL-Professional, *5674 JBL Professional Cinema Products Brochure*. Harman Kardon.
- [58] JBL-Professional, *4675 JBL Professional Cinema products Brochure*. Harman Kardon.

DESAROLLO

Tal como se abordó en la metodología descrita en ??, para el desarrollo experimental de éste proyecto es necesario el desarrollo de cuatro etapas a implementar consistentes en:

- Acondicionamiento y ecualización de sala de pruebas.
- Desarrollo y emisión de patrones de prueba.
- Grabación de respuesta de los canales de audio del sistema.
- Procesamiento y diagnóstico de las señales de respuesta.

1.1 SALA DE PRUEBAS

La implementación de una sala de pruebas con características similares a una sala de exhibición profesional es requerido para la etapa de experimentación del proyecto. En un espacio de 6.5m x 5m acondicionado para sala de pruebas se llevo acabo la etapa de experimentación. Equipo cinematográfico profesional fue implementado para poder sustentar el proceso, y el equipo es el siguiente:

1. 1 Analizador en Tiempo Real (RTA) modelo SA-3052 con micrófono de medición CM-10 marca Audiocontrol[53].
2. 2 micrófonos de medición CM-10 Audiocontrol[54]
3. 1 Amplificador marca QSC modelo ISA 750.
4. 1 Bocina triamplificada marca JBL modelo 8330A.
5. 1 Bafle de subwoofer marca JBL modelo 4642.
6. 3 Bocinas triamplificadas modelo SPK-850BL marca Steren.
7. 1 Procesador cinematográfico Dolby CP750.

Empleando el Analizador de Tiempo Real, mostrado en laFigura 1, se procede a realizar las mediciones de presión sonora, y a realizar la ecualización de la sala de pruebas, al igual que una sala profesional de cine, colocando el

micrófono a $2/3$ de distancia de las bocinas de los canales frontales (pantalla), hacía la parte trasera, y con una altura de un metro y medio de distancia al suelo, apuntando al difusor de la unidad de agudos del canal central[7], como se muestra en laFigura 2.



Figura 1: Analizador en tiempo Real y micrófono de medición marca AudioControl.

La ecualización se realiza inyectando ruido rosa a cana canal y buscando obtener una respuesta que se asemeje a la propuesta por Dolby y la SMPTE *Society of Motion Picture and Television Engineers*, de la curva X ISO 2969, que mitiga los efectos de reverberación, perdidas de altas frecuencias por la pantalla, y las dimensiones de la sala, y que ha sido el estandar de ecualización de sala de cines, desde hace mas de 40 años[55] [56]. La Figura 3 muestra la respuesta en frecuencia deseada en una sala de cine, y se denomina curva X.

El procedimiento se realiza para cada uno de los canales del sistema, y los niveles de SPL para cada canal son indicados en la Tabla 1.

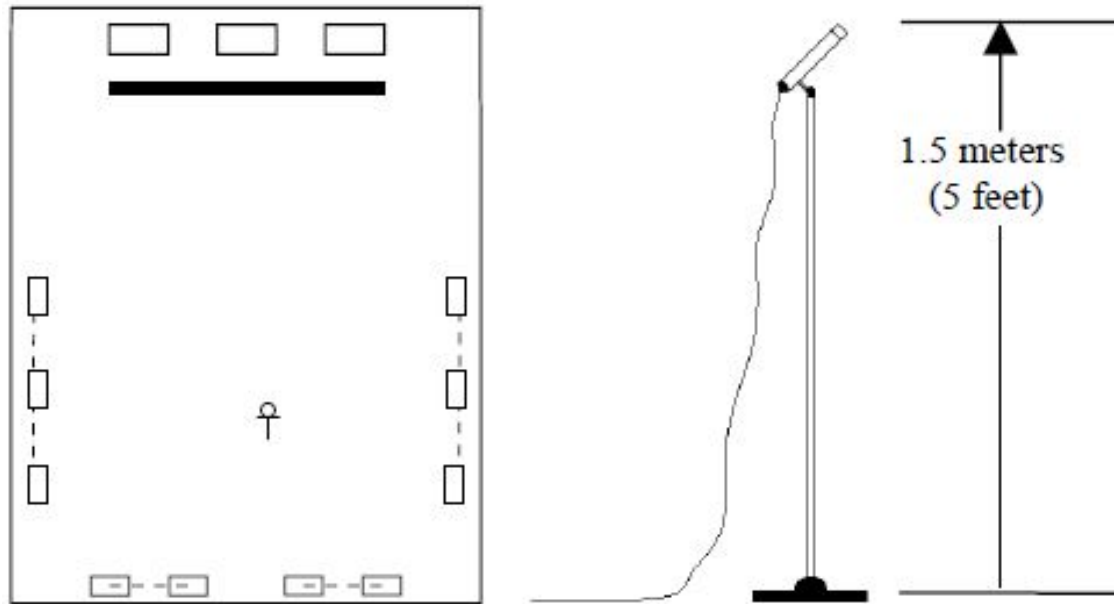


Figura 2: Posición de micrófono de medición para ecualización de sala[7].

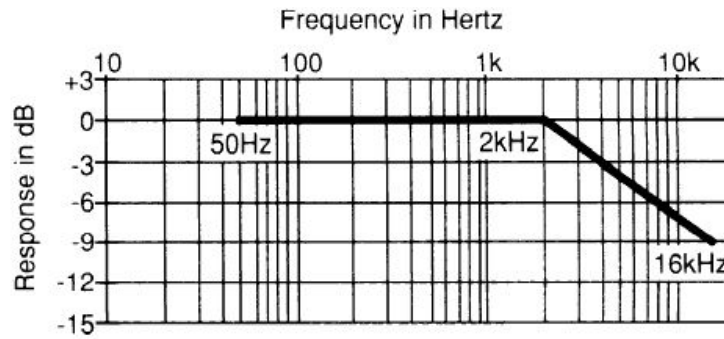
Niveles de Presión Sonora	
Canales Frontales	85 dB
Canales de Surround	82 dB
Subwoofer	90 dB

Tabla 1: Niveles de SPL de acuerdo a la norma curva-X.

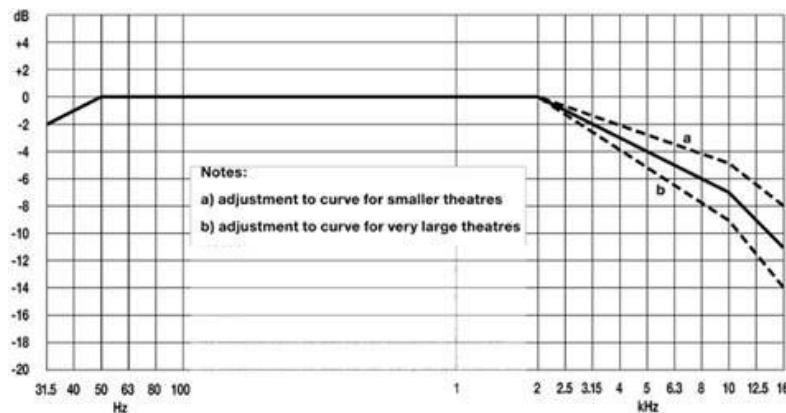
1.2 EMISIÓN DE RUIDO BLANCO

Una vez acondicionada la sala de pruebas, el primer algoritmo a desarrollar en el DSKTMS6713 es el de emisión de ruido blanco. Como se menciona en ??, el ruido blanco es la señal que contiene la suma de todas las frecuencias que conforman el espectro audible al mismo nivel de SPL. El espectro audible se considera de los 20 Hz a los 20KHz y es el mismo rango a las que las bocinas empleadas en el cine responden, el utilizar un patrón de pruebas como el Ruido Blanco permite que las bocinas de cada canal empleen todo su ancho de banda y en caso de presentar anomalías, nos muestren conductas que identifiquen la falla.

Al generar de manera digital el patrón de ruido blanco para posteriormente convertirlo a una señal continua es muy importante el considerar la frecuencia



(a) Curva X.



(b) Curva X con corrección de tamaño de sala.

Figura 3: Curva X de respuesta en frecuencia de una sala de cine[8].

de muestreo con el que éste es generado y así poder cumplir con el ancho de banda requerido por la aplicación, que en éste caso es de por lo menos de 20KHz. Se escogió una Frecuencia de Muestreo F_s de 44.1KHz que es superior en mas del doble de la máxima frecuencia de reproducción de los canales del sistema, lo cual asegura que el ruido blanco generado satisfaga todo el ancho de banda del sistema, a pesar de ser en realidad un ruido blanco de banda limitada[4].

El ruido blanco generado es un algoritmo que emplea 32 bits en una secuencia pseudo aleatoria y es llamado desde una función en C, siendo reproducido en impulsos de 11.61 mili segundos por canal, el procedimiento de generación es el siguiente:

1. Se escoge una semilla de 32 bits con un valor de 0x7E521603.
2. Una suma de complemento a 2 es desarrollada entre los bits 17,28, 30 y 31.

3. El bit menos significativo (LSB) del resultado de la suma es seleccionado. Éste bit que puede tomar el valor de 0 o 1, es escalado a un valor fijo negativo o positivo.
4. A el valor de la semilla se le aplica un corrimiento a la izquierda, y el bit que se obtiene de la suma a complemento a 2 en el paso anterior es asignado a la posición del bit menos significativo de la semilla, y el proceso es repetido desde el primer paso, ahora con un nuevo valor de semilla después del primer corrimiento[5].

El procedimiento de generación del ruido blanco se ilustra en la Figura 4.

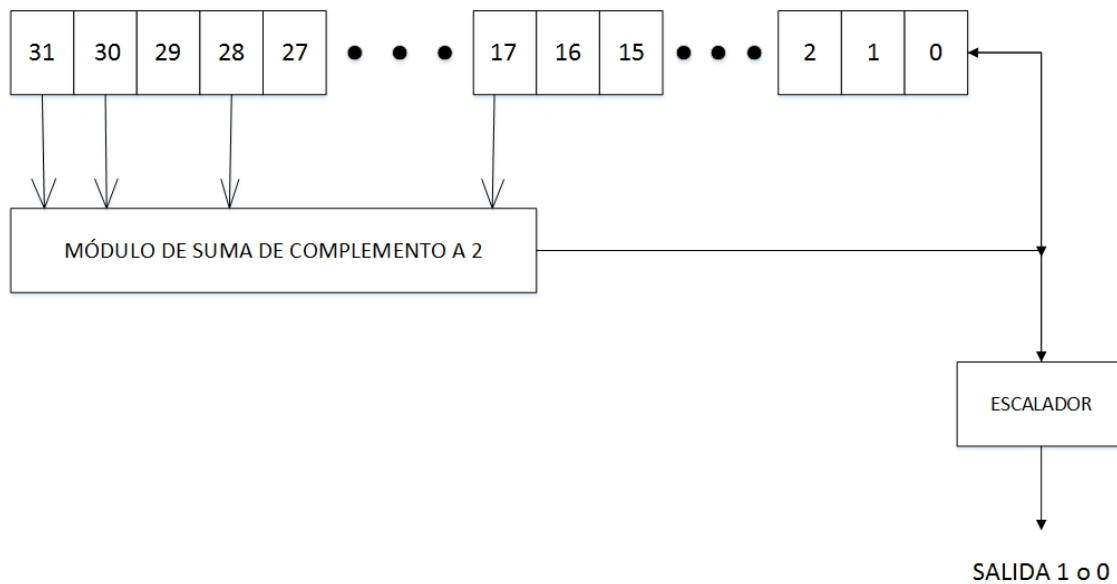


Figura 4: Algoritmo de generación de ruido blanco.

Y el algoritmo de generación se muestra a continuación:

Este algoritmo emplea una función en lenguaje ensamblador llamada en la línea 16 del algoritmo y se encarga de la manipulación de la semilla, ya en el algoritmo se analiza el residuo de la manipulación y de acuerdo al caso escala a un valor positivo o negativo. La función se muestra a continuación:

El algoritmo de generación de ruido blanco se desarrolla en el DSP TMS3206713 dentro de la tarjeta de Desarrollo. Para intercambiar datos de audio entre el DSP y cualquier sistema conectado a la tarjeta de Desarrollo, la tarjeta emplea un codec (Codificador-Decodificador) de audio que realiza la conversión tanto de Análogo a Digital como la conversión de Digital a Análogo. El codec empleado es el AIC23 de la empresa Texas Instruments, y se encuentra incorporado en la

Código 1: Algoritmo de generación de ruido blanco.

```

1 #include "dsk6713_aic23.h" //codec-DSK support file
2 Uint32 fs=DSK6713_AIC23_FREQ_44KHZ; //set sampling rate
3 int previous_seed;
4 short pos = 16000, neg = -16000; //scaling noise level
5 interrupt void c_int11 ()
6 {
7 previous_seed = noisefunc(previous_seed); //call ASM function
8 if(previous_seed & 0x01)
9     output_sample(pos); //positive scaling
10 else
11     output_sample(neg); //negative scaling
12 }
13 void main ()
14 {
15 comm_intr(); //init DSK, codec, McBSP
16 previous_seed = noisefunc(0x7E521603); //call ASM function
17 while (1); //infinite loop
18 }

```

Código 2: Función de generación de ruido blanco.

```

1 .def _noisefunc ;ASM function called from C
2 _noisefunc ZERO A2 ;init A2 for seed manipulation
3 MV A4,A1 ;seed in A1
4 SHR A1,17,A1 ;shift right 17->bit 17 to LSB
5 ADD A1,A2,A2 ;add A1 to A2 => A2
6 SHR A1,11,A1 ;shift right 11->bit 28 to LSB
7 ADD A1,A2,A2 ;add again
8 SHR A1,2,A1 ;shift right 2->bit 30 to LSB
9 ADD A1,A2,A2 ;
10 SHR A1,1,A1 ;shift right 1->bit 31 to LSB
11 ADD A1,A2,A2 ;
12 AND A2,1,A2 ;Mask LSB of A2
13 SHL A4,1,A4 ;shift seed left 1
14 OR A2,A4,A4 ;Put A2 into LSB of A4
15 B B3 ;return to calling function
16 NOP 5 ;5 delays for branch

```

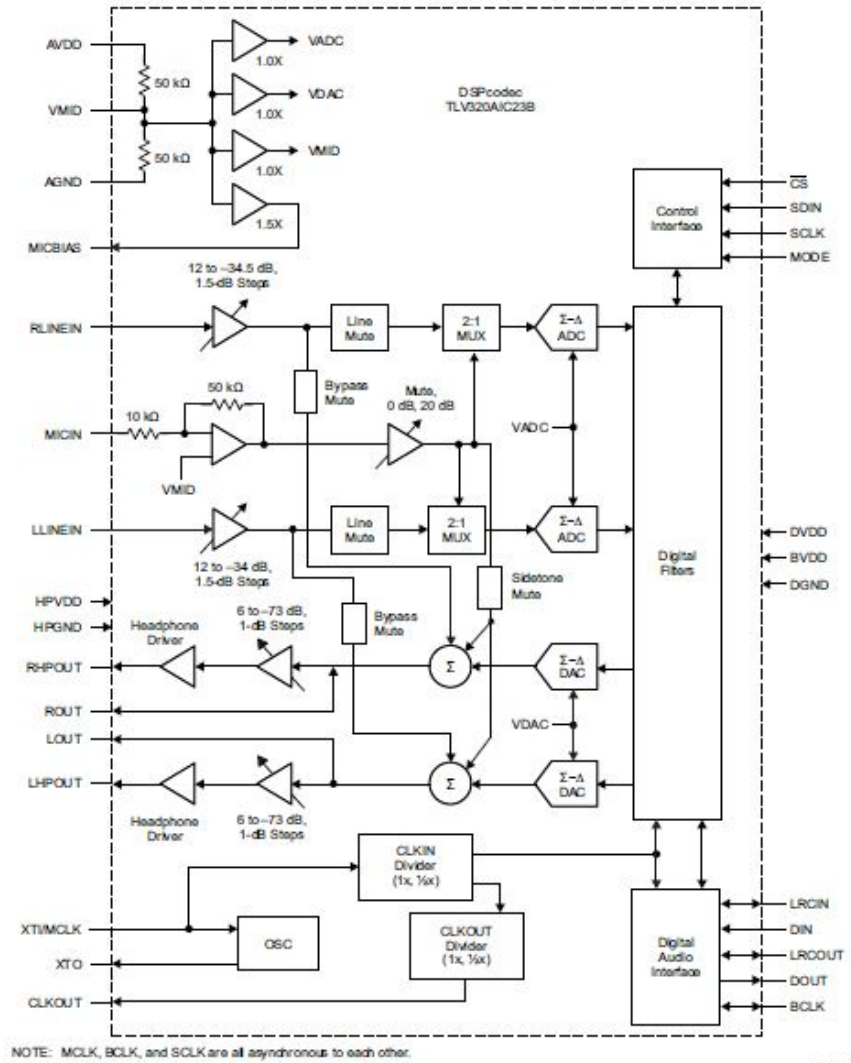


Figura 5: Composición interna de un codec AIC23 de Texas Instruments[9].

tarjeta de desarrollo, el diagrama interno del codec puede verse ilustrado en la Figura 5.

El codec AIC23 es un codificador-decodificador de alto desempeño de señal estéreo, sus convertidos ADC y DAC usan tecnología sigma-delta multibit con filtros digitales de interpolación de sobre muestreo integrados. Tiene la capacidad de manejo de palabras de datos de 16, 20, 24, y 32 bits, con una frecuencia de muestreo programable desde 8KHz a 96KHz[9].

Ya incorporado en la tarjeta de desarrollo, el codec cuenta con una entrada de línea estéreo, una salida de línea estéreo, una entrada auxiliar, y una entrada para micrófono de voz. La entrada a la tarjeta de desarrollo se hace mediante la entrada de línea, y la salida de emisión de ruido, se hace mediante la salida de

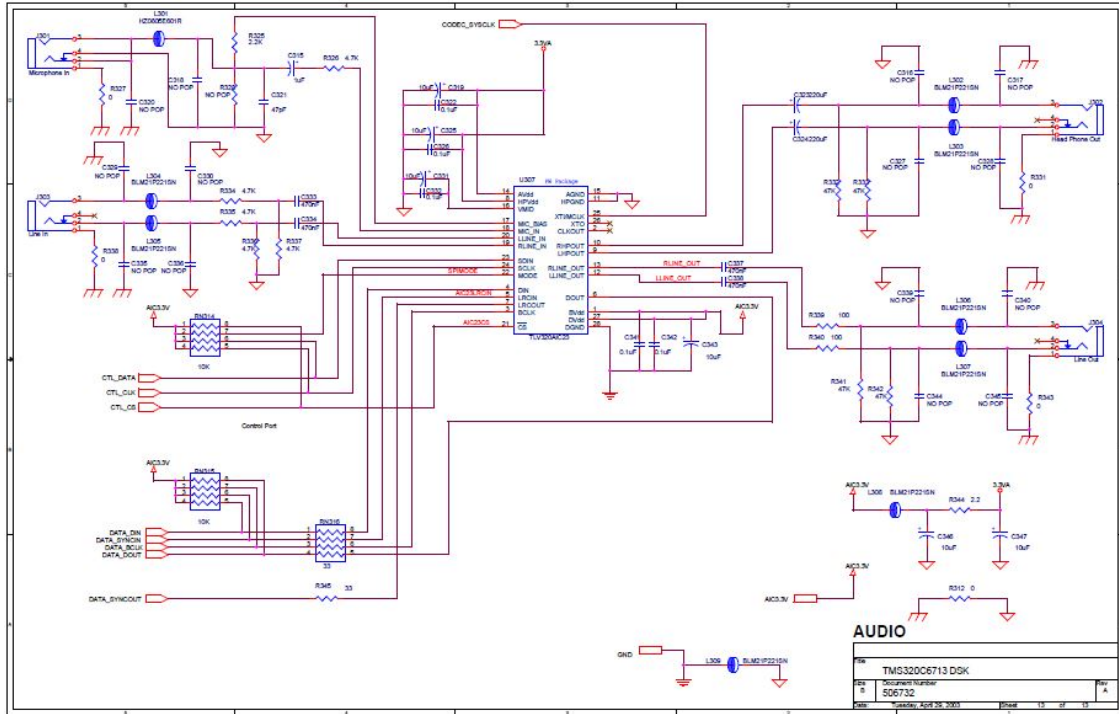


Figura 6: Diagrama de conexión de codec AIC23 en tarjeta de desarrollo DSKTMS3206713 de Spectrum Digital[10].

línea utilizando solo un canal. El diagrama de conexión del codec en la tarjeta de desarrollo DSKTMS3206713 se muestra en la Figura 6

Para reproducir el patrón de ruido blanco ya en la sala de pruebas, se requiere amplificar la señal emitida por el codec por lo que es necesario el conectar la salida de línea de la tarjeta de desarrollo al canal correspondiente en su amplificador. Para hacer la conexión simultanea de los 6 canales del sistema, se desarrolla una tarjeta de multiplexión de la salida de audio del codec y mediante un código de selección se emite el patrón al canal correspondiente. El circuito de la tarjeta multiplexora de salida de audio se muestra en la Figura 7.

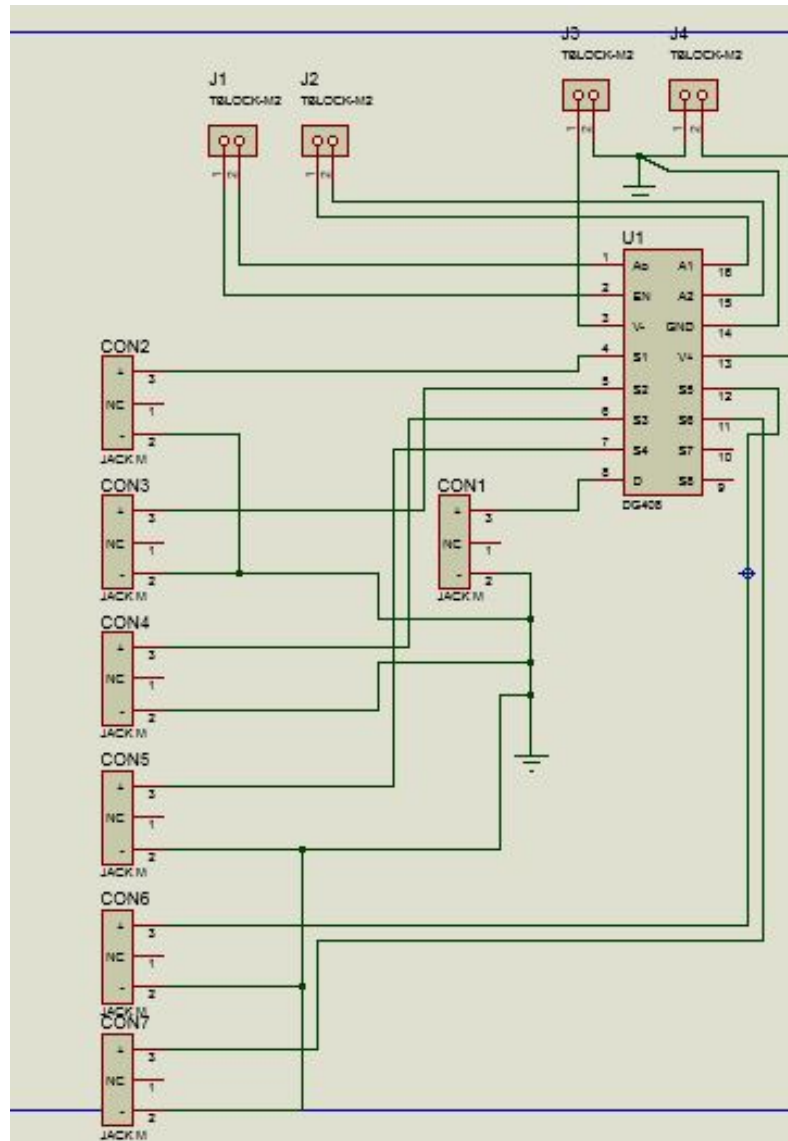


Figura 7: Circuito de tarjeta multiplexora de salida de audio.

Y la tarjeta física se ilustra en la Figura 8.



Figura 8: Circuito de tarjeta multiplexora de salida de audio.

1.3 GRABACIÓN DE RESPUESTA DE LOS CANALES DEL SISTEMA

Las bocinas empleadas por los canales de un sistema 5.1 son capaces de reproducir el espectro audible casi en su totalidad, dependiendo el sistema empleado, la banda espectral de los sistemas de bocina empleados se encuentran desde los 35Hz hasta los 20KHz [57][58]. No todos los micrófonos son capaces de captar este rango de frecuencias por lo que la selección del tipo de micrófono es fundamental para el correcto desarrollo del presente proyecto. Los micrófonos que responden a todo el rango del espectro audible son denominados micrófonos de medición, y son empleados precisamente por instrumentos diseñados para medir el espectro audible humano, como lo es un RTA.

Los micrófonos utilizados en este proyecto es el mismo utilizado por el Analizador de Espectro en Tiempo Real empleado para la ecualización de la sala de pruebas y la etapa de experimentación del proyecto. El fabricante del RTA y los micrófonos es Audiocontrol y el modelo del micrófono empleado es el CM-10 mostrado en la Figura 9.



Figura 9: Micrófono de medición CM-10 de Audiocontrol[11].

La respuesta en frecuencia del micrófono CM-10 es de 20Hz - 20KHz, su SPL máxima es de 136dB y es un micrófono de alimentación fantasma por lo que es necesario brindarle alimentación a su circuito de polarización. El circuito de polarización para un solo micrófono se muestra en la Figura 10.

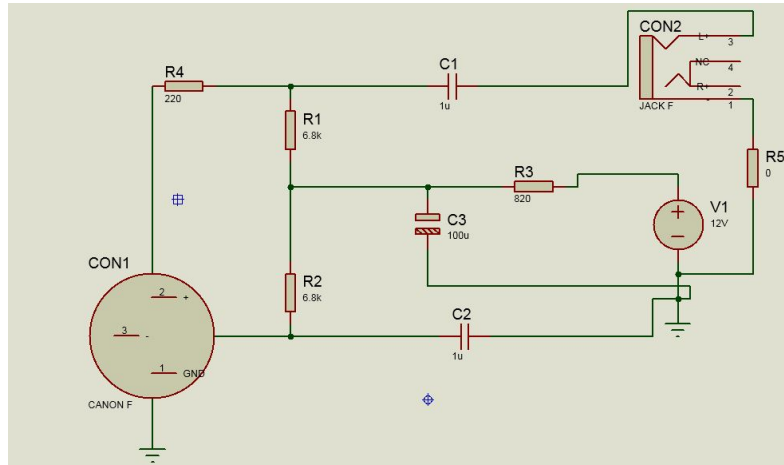


Figura 10: Circuito de polarización para micrófono de medición con alimentación fantasma.

Para realizar las grabaciones de respuesta del sistema en las diferentes posiciones de los micrófonos en la sala de pruebas, se diseñó una tarjeta multiplexora de 4 entradas de micrófonos con selección programable para agilizar la experimentación. Cabe señalar que solo fueron usados 2 micrófonos de medición en la experimentación. El circuito de la tarjeta multiplexora de micrófonos se muestra en la Figura 11.

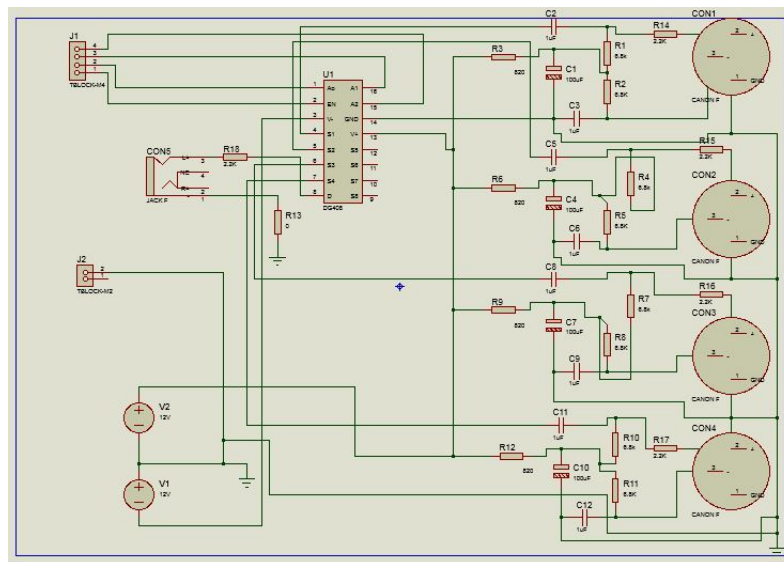


Figura 11: Circuito de tarjeta multiplexora de micrófonos de grabación.

La tarjeta multiplexora de micrófonos se ilustra en la Figura 12

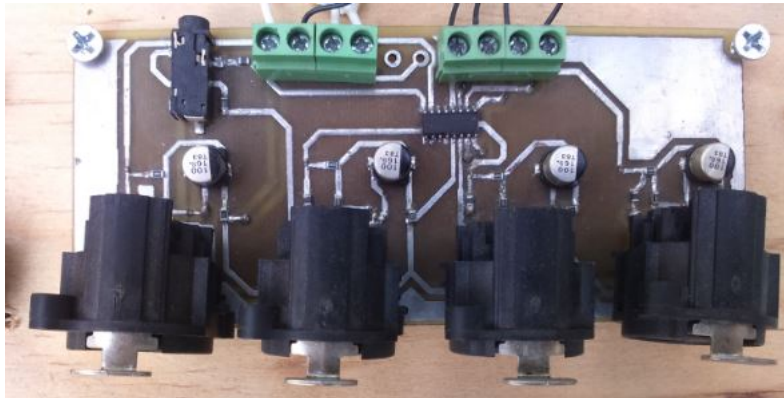


Figura 12: Tarjeta multiplexora de micrófonos de grabación.

Después de emitir el patrón de prueba, se realiza la grabación de la respuesta de cada canal utilizando las dos posiciones de micrófonos referidas en el ??, para los canales frontales solo se utiliza la posición 1, para el canal de Surround izquierdo la posición 1 y posición 2, y para el canal Surround derecho la posición 1 y la posición 3. Las posiciones se muestran en la Figura 13.

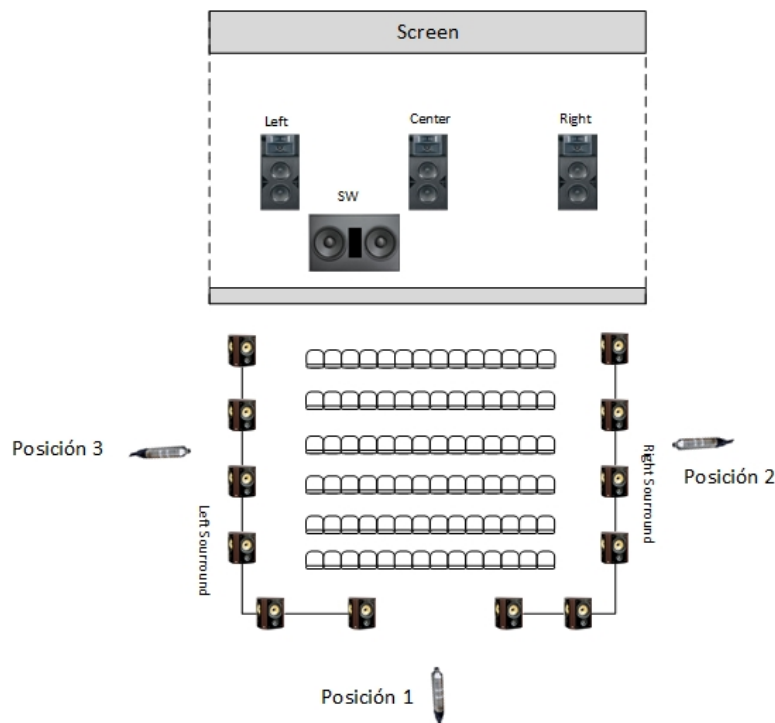


Figura 13: Colocación de los micrófonos de grabación en la sala de pruebas.

Para la grabación de la respuesta primero se digitalizan los datos a una frecuencia de 44.1KHz y un tamaño de 16 bits por muestra, siendo almacenadas

512 muestras de respuesta por canal, almacenadas en la memoria externa que incorpora la tarjeta de desarrollo. El proceso es desarrollado con el siguiente algoritmo:

1.4 PROCESAMIENTO Y DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA

Una vez grabadas cada una de las respuesta al patrón de pruebas de cada canal se procede a realizar el procesamiento de señales de los datos recavados. Para analizar los datos grabados se emplea un algoritmo de FFT de 512 puntos, el algoritmo llama una función genérica en C. Las constantes de giro son generadas dentro del programa principal y los datos a transformar son las grabaciones realizadas por canal por lo que primero son copiados los datos dentro de los registros de muestra que son utilizados por la función de FFT, y luego transformados por cada localidad llamando la función. El proceso se repite por cada registro de grabación y la respuesta se almacena en registros ya procesados (xl,xc,xr,xsl,xsr y xsw), una archivo .dat también es generado por el programa para poder ser analizado estadísticamente con la ayuda de otros programas como Matlab y Excel. El algoritmo de procesamiento y su etapa final de diagnóstico del sistema se muestra a continuación:

La etapa de diagnóstico y emisión de firma de errores se hace con las referencias obtenidas al caracterizar los modelos ideales y los modelos con errores inducidos, y después de analizar los datos de manera estadística y establecer los umbrales de operación tanto ideales como con fallas, el estudio de estos datos se aborda en el CAPITULO 4.

La función de procesamiento de FFT a la cual se llama se muestra a continuación:

```

1 //FFT.c C callable FFT function in C
2
3 #define PTS 512 // # of points for FFT
4 typedef struct {float real,imag;} COMPLEX;
5 extern COMPLEX w[PTS]; //twiddle constants stored in w
6
7 void FFT(COMPLEX *Y, int N) //input sample array, # of points
8 {
9 COMPLEX temp1,temp2; //temporary storage variables
10 int i,j,k; //loop counter variables
11 int upper_leg, lower_leg; //index of upper/lower butterfly leg
12 int leg_diff; //difference between upper/lower leg
13 int num_stages = 0; //number of FFT stages (iterations)
14 int index, step; //index/step through twiddle constant
15 i = 1; //log(base2) of N points= # of
    stages

```

Código 3: Algoritmo para grabación de respuesta de canales.

```

1 #include "dsk6713_aic23.h" //codec-DSK support
   file
2 Uint32 fs=DSK6713_AIC23_FREQ_44KHZ; //set sampling rate
3 #include <stdio.h>
4 #include <math.h>
5 #define PTS 512 // # of points for FFT, and
   recording vectors
6 short pos=9500, neg=-9500; //scaling noise level
7 int i;
   //index variable
8 short flag;
9 float grabal[PTS]; //left recording register
10 float grabac[PTS]; //center recording register
11 float grabar[PTS]; //right recording register
12 float grabasl[PTS]; //sl recording register
13 float grabasr[PTS]; //sr recording register
14 float grabasw[PTS]; //sw recording register
15 #pragma DATA_SECTION( grabal, ".EXTRAM") //buffer ->external memory
16 #pragma DATA_SECTION( grabac, ".EXTRAM") //buffer ->external memory
17 #pragma DATA_SECTION( grabar, ".EXTRAM") //buffer ->external memory
18 #pragma DATA_SECTION( grabasr, ".EXTRAM") //buffer ->external memory
19 #pragma DATA_SECTION( grabasl, ".EXTRAM") //buffer ->external memory
20 #pragma DATA_SECTION( grabasw, ".EXTRAM") //buffer ->external memory
21
22 interrupt void c_int11()
23 {
24     previous_seed = noisefunc(previous_seed); //call ASM function
25
26     if (flag < 0xC)
27     {
28         if (previous_seed & 0x01) //White noise
29             generation
30             output_sample(pos);
31         else
32             output_sample(neg);
33         if (flag == 6)
34         {
35             DSK6713_LED_on(0);
36             //visual board indicator
37             grabal[i] = (float)input_sample(); //left
38             recording
39         }
40         if (flag == 7)
41         {
42             DSK6713_LED_off(0);
43             //visual board indicator
44             DSK6713_LED_on(1);
45             grabac[i] = (float)input_sample(); //center
46             recording
47         }
48         if (flag == 8)
49         {
50             [15 de noviembre de 2016 at 14:43 - classicthesis version 1.0 ]
51             DSK6713_LED_on(0);
52             //visual board indicator
53             grabar[i] = (float)input_sample(); //right

```

Código 4: Algoritmo para el procesamiento y diagnóstico de los canales del sistema.

```

1 main()
2
3 {
4 comm_intr();
5 DSK6713_DIP_init();
6 DSK6713_LED_init();
7 i=0; var=0; flag=0; j=0;
8 DSK6713_LED_off(0);
9 DSK6713_LED_off(1);
10 DSK6713_LED_off(2);
11 DSK6713_LED_off(3);
12 previous_seed = noisefunc(0x7E521603); //call ASM function
13
14 for (j = 0 ; j<PTS ; j++) // set up twiddle constants in w
15 {
16 w[j].real = cos(2*PI*j/512.0); //Re component of twiddle constants
17 w[j].imag =-sin(2*PI*j/512.0); //Im component of twiddle constants
18 }
19
20 for (j=0;j<PTS;j++) //Result registers set to 0
21 {
22 x1[j]=0;
23 xc[j]=0;
24 xr[j]=0;
25 xsl[j]=0;
26 xsr[j]=0;
27 xsw[j]=0;
28 }
29
30 while (1)
31 {
32 if (flag==0x13) //Verifying white noise and start
    recording.
33 {
34 DSK6713_LED_on(3);
35 for(i=0;i<PTS;i++) //Copying Recording
    registers to FFT function
36 {
37 samples[i].real=grabal[i];
38 samples[i].imag=0.0;
39 }
40 FFT(samples,PTS);
41 for(i=0;i<PTS;i++)
42 {
43 x1[i]=sqrt(samples[i].real*samples[i].real + samples[i]
    ].imag*samples[i].imag)/1500000;
44 } //
    Getting Spectrum Magnitude
45 flag=flag+1;
46 }
47
48 if (flag==0x14) [15 de noviembre de 2016 at 14:43 - classicthesis version 1.0 ]
49 {
50 DSK6713_LED_on(2);

```

```

16 do
17 {
18   num_stages +=1;
19   i = i*2;
20 }
21 while (i!=N);
22 leg_diff = N/2;    //difference between upper&lower legs
23 step = 512/N;     //step between values in twiddle.h
24 for (i = 0;i < num_stages; i++) //for N-point FFT
25 {
26   index = 0;
27   for (j = 0; j < leg_diff; j++)
28   {
29     for (upper_leg = j; upper_leg < N; upper_leg += (2*leg_diff))
30     {
31       lower_leg = upper_leg+leg_diff;
32       temp1.real = (Y[upper_leg]).real + (Y[lower_leg]).real;
33       temp1.imag = (Y[upper_leg]).imag + (Y[lower_leg]).imag;
34       temp2.real = (Y[upper_leg]).real - (Y[lower_leg]).real;
35       temp2.imag = (Y[upper_leg]).imag - (Y[lower_leg]).imag;
36       (Y[lower_leg]).real = temp2.real*(w[index]).real
37                           -temp2.imag*(w[index]).imag;
38       (Y[lower_leg]).imag = temp2.real*(w[index]).imag
39                           +temp2.imag*(w[index]).real;
40       (Y[upper_leg]).real = temp1.real;
41       (Y[upper_leg]).imag = temp1.imag;
42     }
43   index += step;
44   }
45   leg_diff = leg_diff /2;
46   step *= 2;
47   }
48   j = 0;
49   for (i = 1; i < (N-1); i++) //bit reversal for resequencing
50     data
51     {
52       k = N/2;
53       while (k <= j)
54       {
55         j = j - k;
56         k = k/2;
57       }
58       j = j + k;
59       if (i<j)
60       {
61         temp1.real = (Y[j]).real;
62         temp1.imag = (Y[j]).imag;
63         (Y[j]).real = (Y[i]).real;

```

```

63     (Y[j]).imag = (Y[i]).imag;
64     (Y[i]).real = temp1.real;
65     (Y[i]).imag = temp1.imag;
66     }
67 }
68 return;
69 }

```

Una vez analizados los códigos desarrollados para el desarrollo del proyecto, es posible el representar el funcionamiento del sistema mediante un diagrama de flujo general, como el mostrado en la Figura 14.

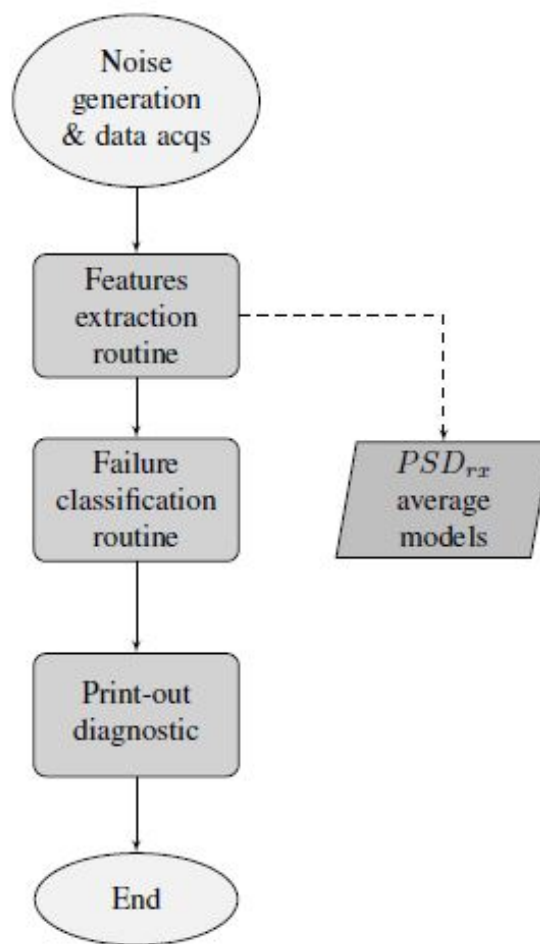


Figura 14: General algorithm for features extractions and failure classification modes for the 5.1 audio cinema system.

El diagnóstico de los canales frontales, los canales de surround y el canal de subwoofer, presentan peculiaridades que los hacen diferentes en su análisis y

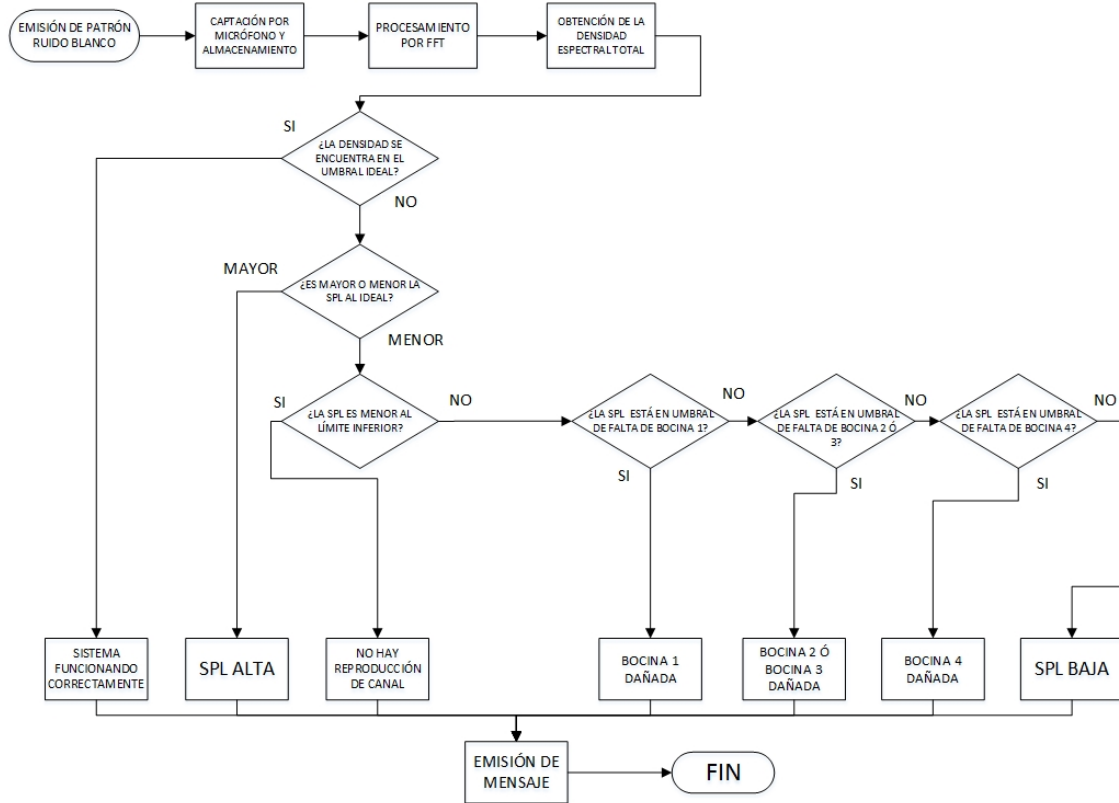


Figura 16: Diagrama de flujo para diagnóstico de canales de surround de un sistema 5.1.

El diagrama de flujo del algoritmo para el diagnóstico del canal de subwoofer, se muestra en la Figura 17

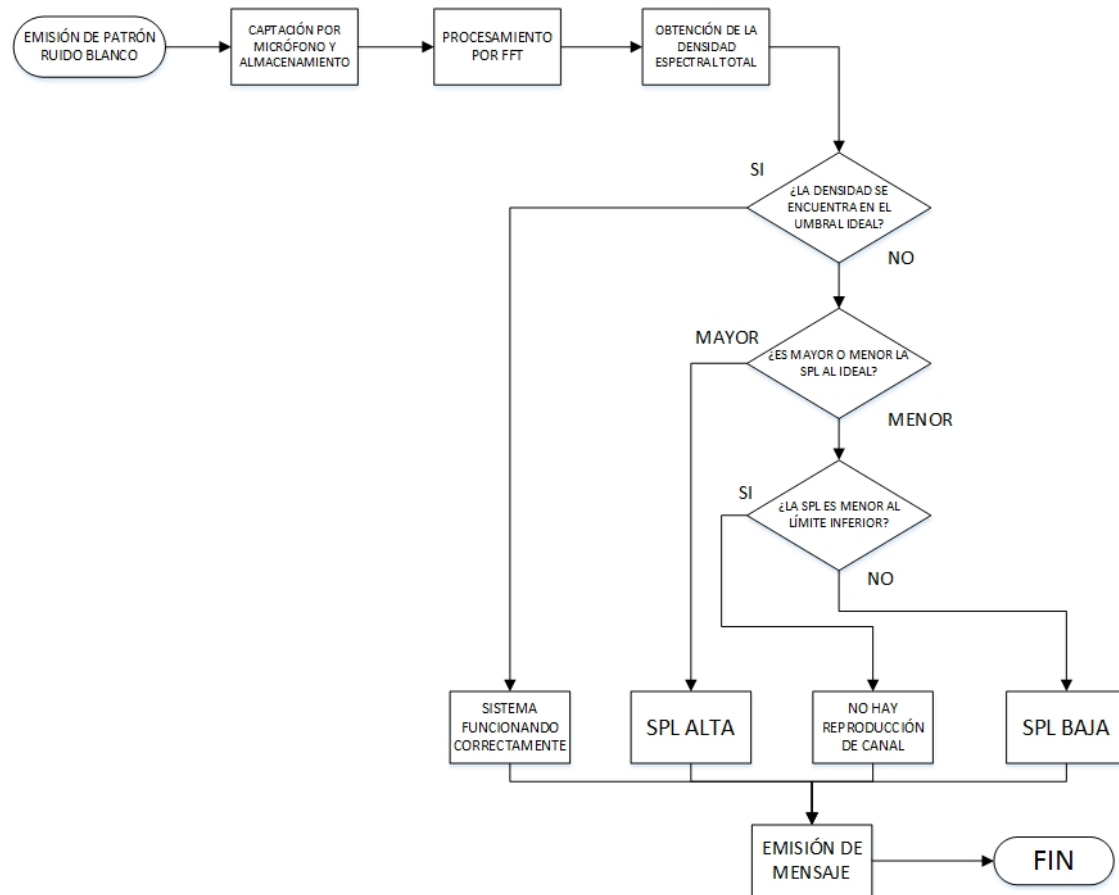


Figura 17: Diagrama de flujo para diagnóstico de canal de subwoofer de un sistema 5.1.

Una vez realizadas las 4 etapas del proyecto, los experimentos se repiten para formar una base de datos estadística, y ya establecidos los umbrales de operación, se fijan los parámetros de las variables a observar para determinar la correcta o incorrecta operación del sistema 5.1. Los modelos obtenidos son tema de análisis en el siguiente capítulo.

EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS

2.1 DENSIDAD DE POTENCIA ESPECTRAL (*PSD*)

Habiendo desarrollado cada una de las etapas que conformaron el proyecto descrito en el [Capítulo 1](#) y después de repetir los experimentos para obtener los modelos espectrales y analizar estadísticamente los datos recolectados, se observó que de acuerdo a la hipótesis planteada, era posible obtener un modelo ideal del sistema, y que además este modelo presentaba variaciones considerables al ser inducidas fallas al sistema, tanto en densidad espectral como en potencia total. La obtención de la densidad espectral total resultante del cálculo de la FFT de 512 puntos se resume a la formula de la ecuación 1

$$PSD = \sum_{k=1}^{(N/2)-1} G \cdot X(k) \quad (1)$$

En donde la ecuación describe como se obtiene PSD (*Power Spectral Density, Densidad de Potencia Espectral*) y N es el número de puntos de la transformada, $N = 512$ puntos, y G es la ganancia arbitraria para escalar los datos, en este caso $G = \frac{1}{150,000}$.

La descomposición de las bandas tonales es un asunto trascendental para la identificación del funcionamiento de los canales frontales, por lo que la obtención de las bandas de frecuencia baja, frecuencia media y frecuencia alta se efectúan mediante la aplicación de la ecuaciones 2,3 y 4.

$$PSD_L = \sum_{k=1}^6 G \cdot X(k) \quad (2)$$

$$PSD_M = \sum_{k=7}^{57} G \cdot X(k) \quad (3)$$

$$PSD_H = \sum_{k=58}^{255} G \cdot X(k) \quad (4)$$

Para el caso de los canales frontales, la información recabada para los modelos ideales se muestran a continuación.

2.2 MODELADO DE CANALES FRONTALES

2.2.1 Modelado ideal canales frontales

2.2.2 Canal Izquierdo

La Figura 18 ilustra la densidad espectral después de procesar los datos obtenidos por el algoritmo de FFT de 512 puntos en el canal izquierdo con condiciones ideales en SPL, ecualización del canal y las bocinas funcionando correctamente, los experimentos se repitieron 30 veces por condición y por canal. La figura ilustra 6 tomas de los datos obtenidos siempre en el mismo intervalo de tiempo de grabación.

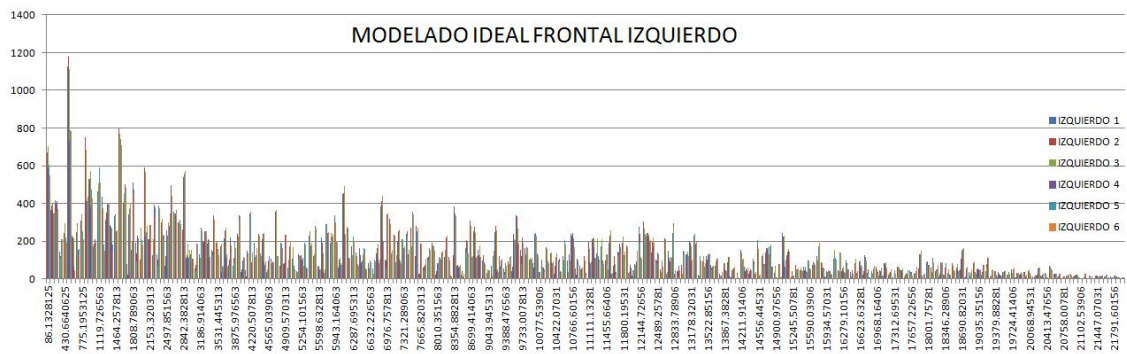


Figura 18: Modelado espectral de canal izquierdo en condiciones ideales.

La gráfica de la Figura 18 ilustra la magnitud obtenida en todo el ancho de banda del canal, con una resolución de 86.1328 Hz obtenida de la división de la Frecuencia de muestreo y los puntos de la FFT(512). Se observa que las magnitudes más altas corresponden a las frecuencias bajas y la magnitud obtenida de la transformada rápida va descendiendo conforme la frecuencia se incrementa, pero se observa una respuesta en todo el ancho de banda del canal, correspondiente al espectro audible. La gráfica también muestra la poca variación entre experimentos, manteniendo una tendencia de respuesta al ruido blanco inducido. El valor promedio del modelo obtenido del canal izquierdo en condiciones ideales se muestra en la Figura 19.

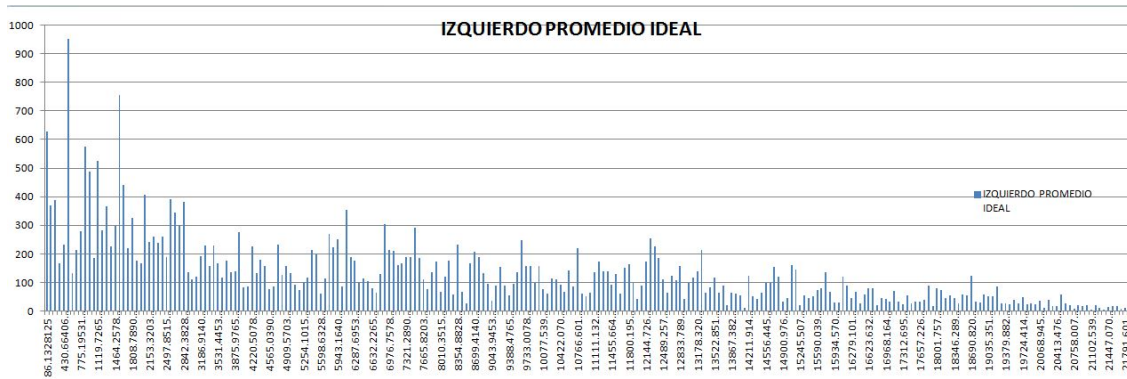


Figura 19: Modelado espectral promedio de canal Izquierdo.

2.2.3 Canal Central

Al igual que el modelado para el canal izquierdo, la Figura 20 muestra el modelado en condiciones ideales para el canal central, la misma cantidad de tomas fue realizada, y la gráfica despliega 6 diferentes grabaciones de respuesta ya procesadas por la FFT.

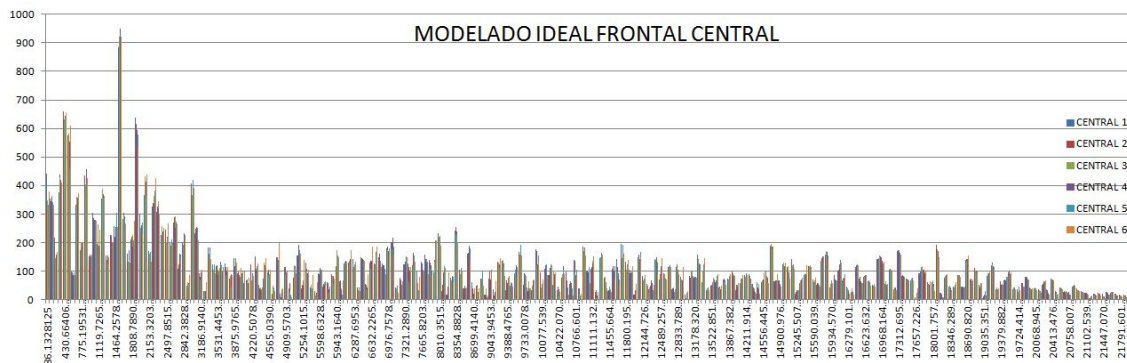


Figura 20: Modelado espectral de canal central en condiciones ideales.

Y el promedio de las respuestas procesadas para el mismo canal se observan en Figura 21.

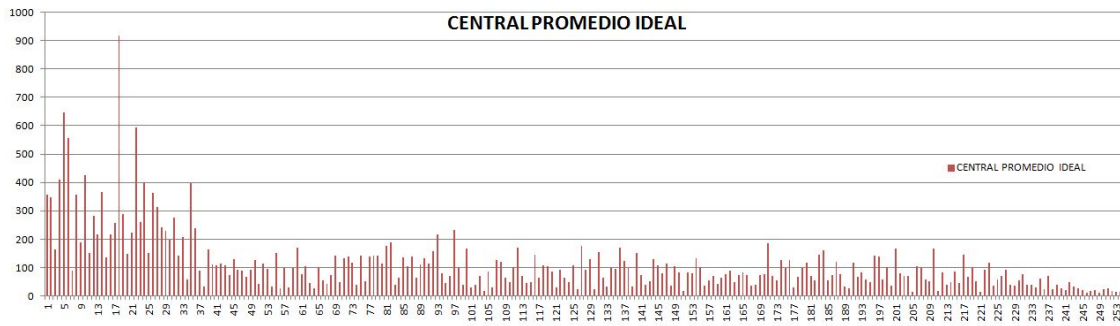


Figura 21: Promedio del modelado de respuesta a ruido blanco en canal central.

2.2.4 Canal derecho

De manera paralela a los otros dos canales frontales la obtención del espectro en frecuencia para el canal derecho fue realizada bajo las mismas condiciones ideales, y bajo las mismas tomas. La Figura 22 muestra 6 diferentes respuestas procesadas de la grabación de la respuesta del canal en condiciones ideales.

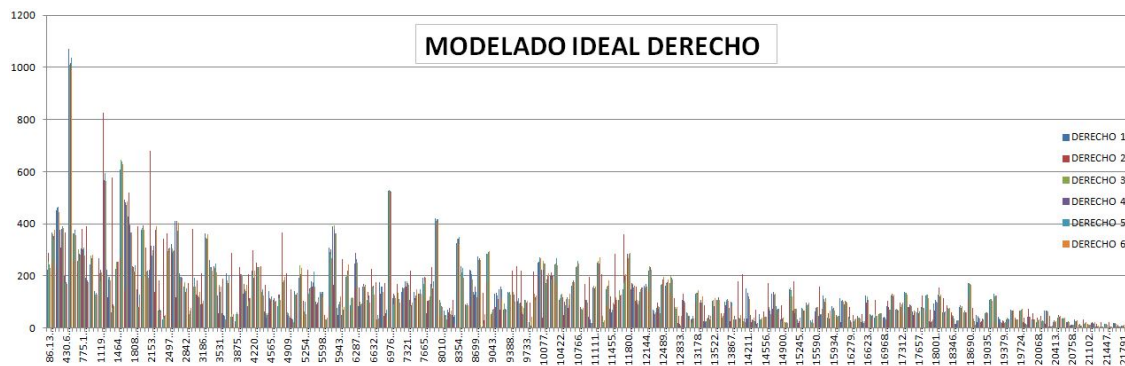


Figura 22: Modelado espectral de canal derecho en condiciones ideales.

Y al igual que los otros canales frontales, la respuesta promedio del modelo en frecuencia del canal derecho se ilustra en la Figura 23.

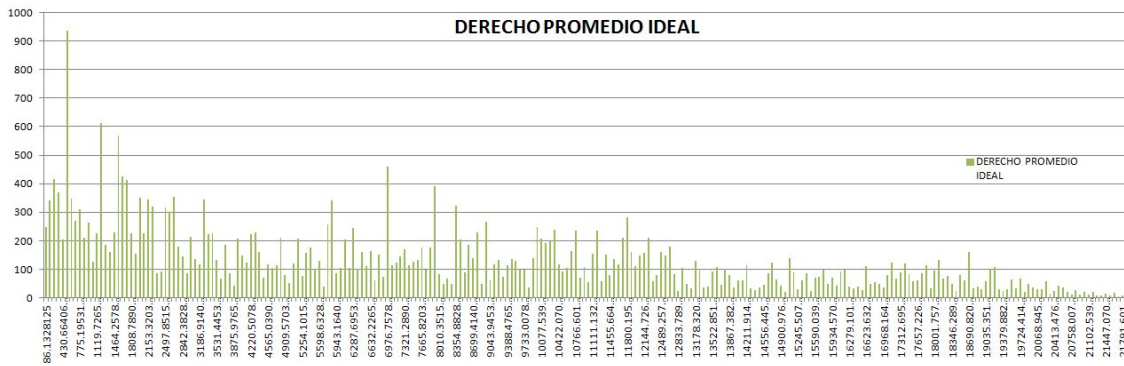


Figura 23: Promedio del modelado espectral para el canal derecho en condiciones ideales.

Si se hace un comparativo entre las respuestas promedio en condiciones ideales de los 3 canales frontales, la Figura 24 muestra las 3 gráficas de los promedios ideales en cada canal, los cuales son considerados como los modelos ideales para el proyecto. Es necesario recalcar que la figura se ilustra en tiempo continuo solo para analizar la relación entre los 3 canales, pero las respuestas siguen siendo en tiempo discontinuo, y ya procesadas las respuestas mediante FFT.

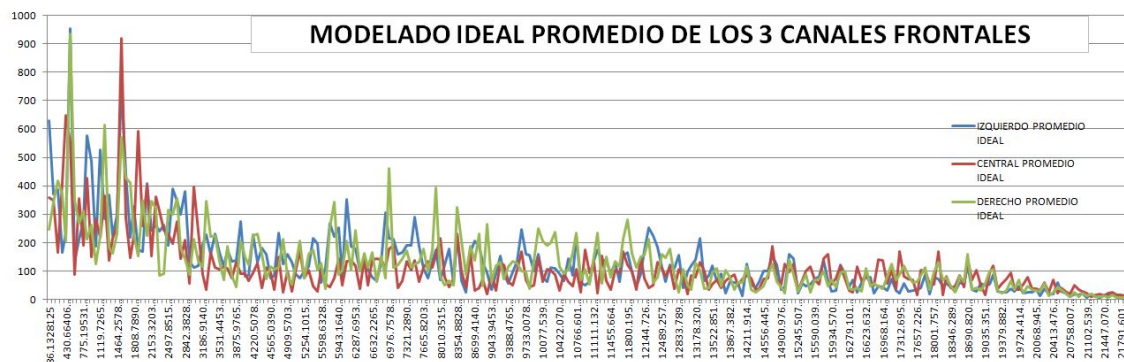


Figura 24: Promedio de los 3 canales frontales en condiciones ideales.

En la Figura 24 se observa que el comportamiento de los 3 canales es muy similar en todo el ancho de banda, aunque se aprecia el central en un nivel más bajo de magnitud comparado a los canales izquierdo y derecho. Ésto se entiende si se recuerda la posición física de los canales derecho e izquierdo respecto a el micrófono de equalización y el micrófono de grabación para la posición de los canales frontales, este micrófono se encuentra prácticamente en frente del canal central, como lo muestra la Figura 13 y la Figura 2, al encontrarse más cerca el micrófono de equalización del canal central y de frente, la potencia que

se requiere del amplificador para generar 85dB en el canal central es menor que la de los canales izquierdo y derecho que se encuentran a mayor distancia del micrófono de equalización, aunque las curvas de equalización sean muy similares, la posición de ambos micrófonos se ilustra en la Figura 25. Esta condición se refleja en la gráfica de la Figura 24 en donde se ve una misma tendencia pero un central a menor potencia. Si se analiza solo los dos canales frontales extremos la paridad en su respuesta es mas notoria como lo ilustra la Figura 26.

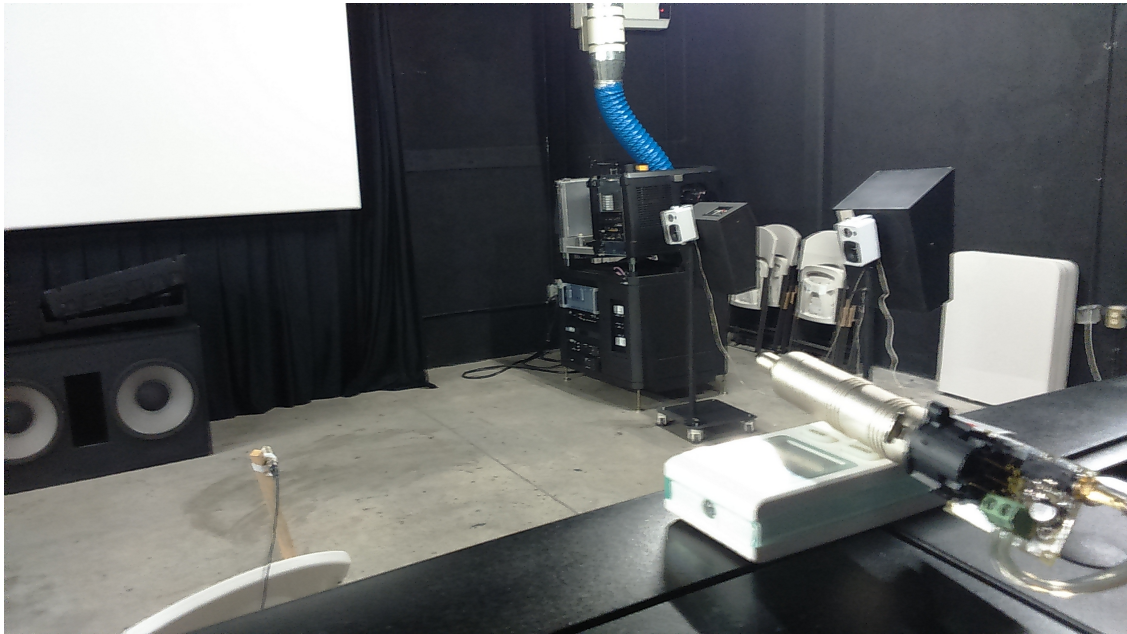


Figura 25: Posición de micrófono de equalización y posición de micrófono de grabación para canales centrales.

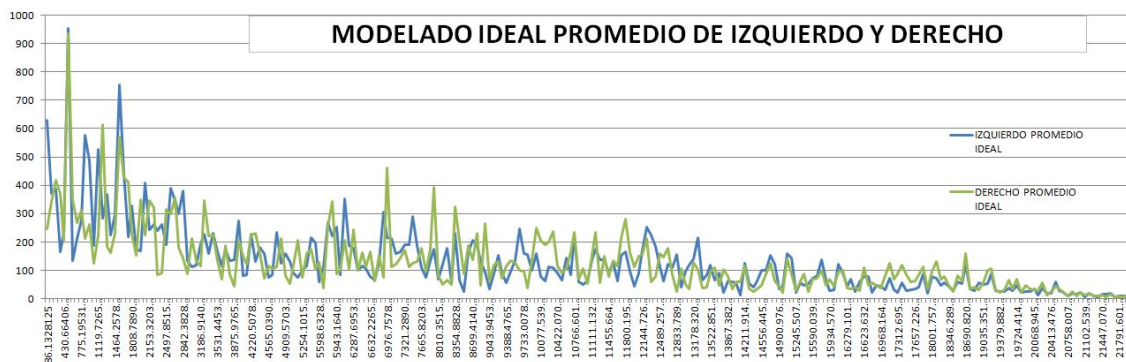


Figura 26: Promedio de los canales izquierdo y derecho en condiciones ideales.

Para la corroboración de los experimentos, las mediciones se acompañaron de mediciones en tiempo real con la ayuda del RTA, y la respuesta por banda de cada frecuencia se visualizó en la sala de pruebas, para entender un poco más las gráficas en respuesta presentadas en condiciones ideales es importante decir que esas gráficas se comportan de la misma manera que un RTA funciona, mostrando la magnitud de cada octava de frecuencia al ser reproducido un ruido patrón, en éste caso el ruido blanco. La Figura 27 ilustra la respuesta del canal izquierdo en condiciones ideales al ser reproducido el ruido blanco en el canal.



Figura 27: Respuesta de canal izquierdo a la reproducción del ruido blanco visto en el RTA.

La tabla 2 bosqueja y resume las densidades de potencia espectral obtenidas en condiciones ideales para los 3 canales frontales, y muestra la separación de tonos, también en condiciones ideales.

	PSD	PSD_L	PSD_M	PSD_H
$SPL \approx 85.3 \text{ dB}$	$\sum_{k=1}^{255} G \cdot X(k)$	$\sum_{k=1}^6 G \cdot X(k)$	$\sum_{k=7}^{57} G \cdot X(k)$	$\sum_{k=58}^{255} G \cdot X(k)$
LEFT	33391	2737	12390	18265
CENTER	28422	2484	10280	15658
RIGHT	32826	2513	11080	19233

Tabla 2: Frontal Channels Ideal Modelling PSD Average Values.

2.3 INDUCCIÓN DE FALLAS EN CANALES FRONTALES

2.3.1 Canal izquierdo sin unidad de bajos

Una vez obtenido el modelo promedio ideal, se procedió a obtener el modelado al inducir fallas a cada canal. La primer falla inducida es simulando una unidad de bajos dañada, por lo que se procedió a desconectar la unidad de bajos en la bocina en posición del canal izquierdo, la respuesta después del procesamiento se ilustra en la Figura 28.

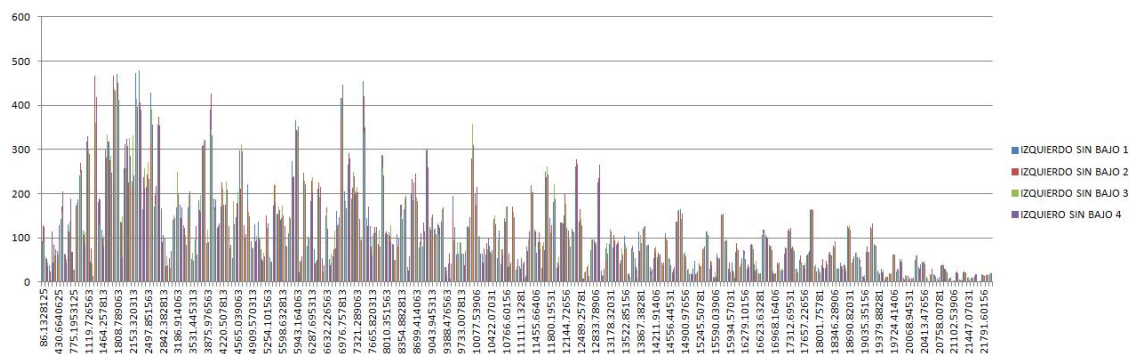


Figura 28: Espectrograma de canal izquierdo sin unidad de bajos.

En la Figura 28 se grafican 4 diferentes muestras de la respuesta del canal con la falla inducida de unidad de bajos dañada. Si se compara la Figura 28 que muestra el espectrograma del canal izquierdo sin unidad de bajos, con la Figura 19 que ilustra el mismo canal en condiciones ideales, se observa una disminución de la potencia de las frecuencias bajas, especialmente en el rango de 0 a 500 Hz, en el rango de las frecuencias medias también se ve disminuida un poco la potencia de las bandas de este rango de frecuencia aunque en una menor proporción, y a partir de los 2500Hz, que es donde comienza el rango de

las frecuencias altas, no se ve alteración en el comportamiento. Esta descripción se muestra en la Figura 29.

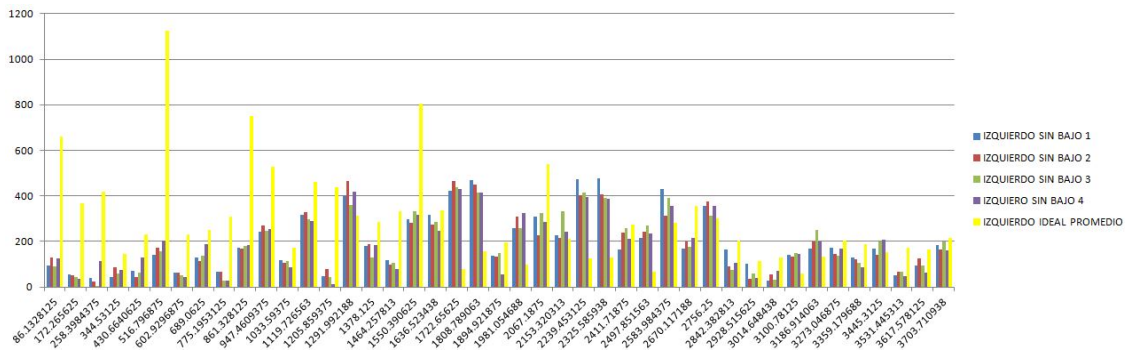


Figura 29: Comparativa del espectrograma de canal izquierdo sin unidad de bajos respecto al canal en condiciones ideales.

2.3.2 Canal central sin unidad de bajos

Al igual que el procedimiento de inducción de fallas en el canal izquierdo, se indujo la misma falla al canal central, se desconecta la unidad de bajos, y se procede a obtener la Densidad de Potencia Espectral total y por bandas del canal, el resultado gráfico es mostrado en la Figura 30.

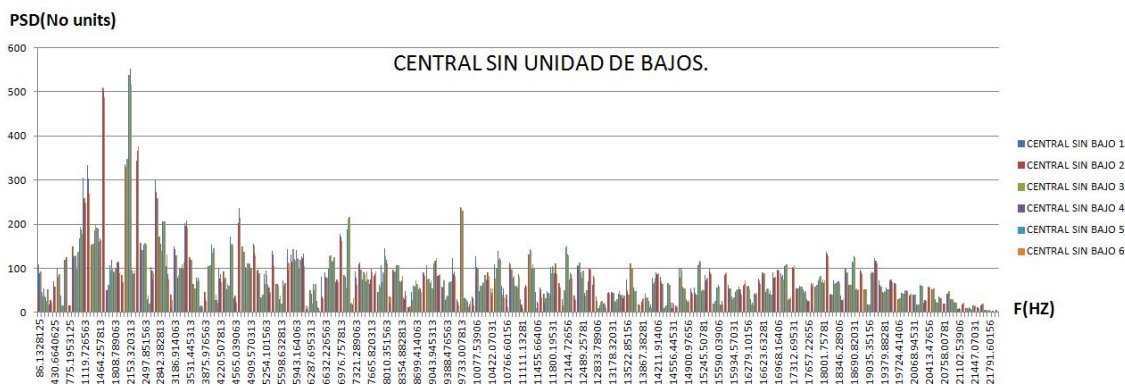


Figura 30: Canal central sin unidad de bajos.

Al comparar la Figura 30 con el promedio ideal del canal en condiciones ideales mostrado en Figura 21, se observa la disminución de frecuencias en el rango de las frecuencias bajas y medias, siendo radical la variación de las frecuencias bajas, tal como ilustra la Figura 31.

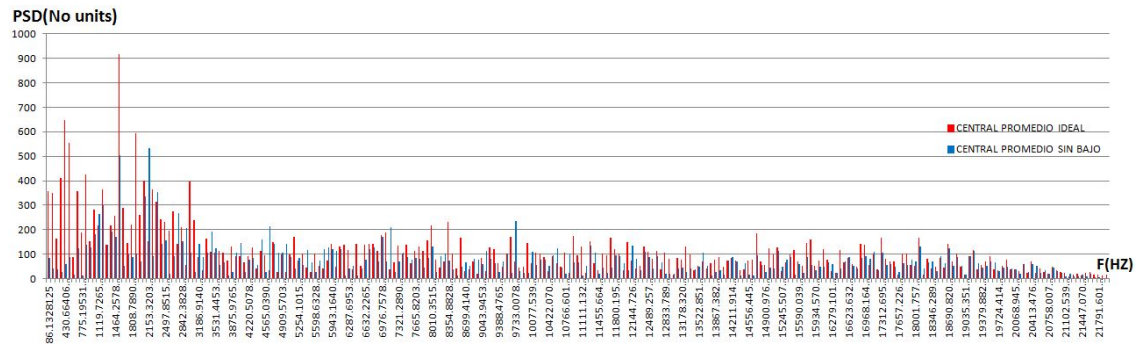


Figura 31: Comparativa del canal central sin unidad de bajos vs canal central promedio ideal.

2.3.3 Canal Derecho sin unidad de bajos

Acorde a la metodología propuesta, el mismo procedimiento de fallas inducidas es aplicado al canal derecho. La Figura 32 muestra la PSD total obtenida de 6 experimentos diferentes con el canal derecho sin unidad de bajos.



Figura 32: Canal derecho sin unidad de bajos.

Si se compara nuevamente la PSD promedio de la respuesta del canal derecho ideal mostrado en la Figura 23 con el promedio del mismo canal sin unidad de bajos, el resultado se muestra la Figura 33 en donde nuevamente se observa la misma tendencia que en los otros canales frontales, en donde las frecuencias bajas prácticamente desaparecen, y las frecuencias medias se ven disminuidas.

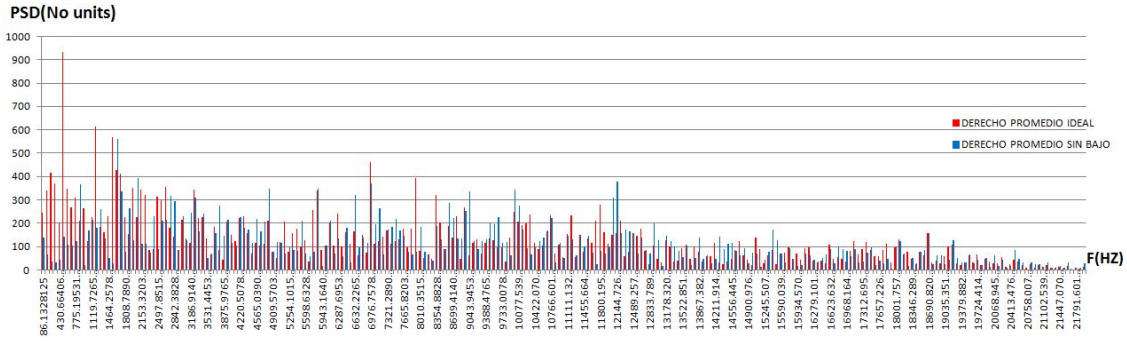


Figura 33: Comparativa del canal derecho promedio ideal y canal derecho sin unidad de bajos.

Los valores de los modelos obtenidos en los canales frontales al inducir la falla de unidad de bajos dañada se muestra en la tabla 3.

	PSD	PSD_L	PSD_M	PSD_H
$SPL \approx 84dB$	$\sum_{k=1}^{255} G \cdot X(k)$	$\sum_{k=1}^6 G \cdot X(k)$	$\sum_{k=7}^{57} G \cdot X(k)$	$\sum_{k=58}^{255} G \cdot X(k)$
LEFT	28513	513	10285	17715
CENTER	19666	338	7143	12186
RIGHT	29211	462	9442	19307

Tabla 3: Frontal Channels With No Lowrange Driver PSD Average Values.

2.3.4 Canal Izquierdo sin unidad de medios

Cuando se induce la falla de ausencia de unidad de medios para el canal izquierdo y la PSD total es graficada para 6 experimentos diferentes, el resultado observado es ilustrado en la Figura 34

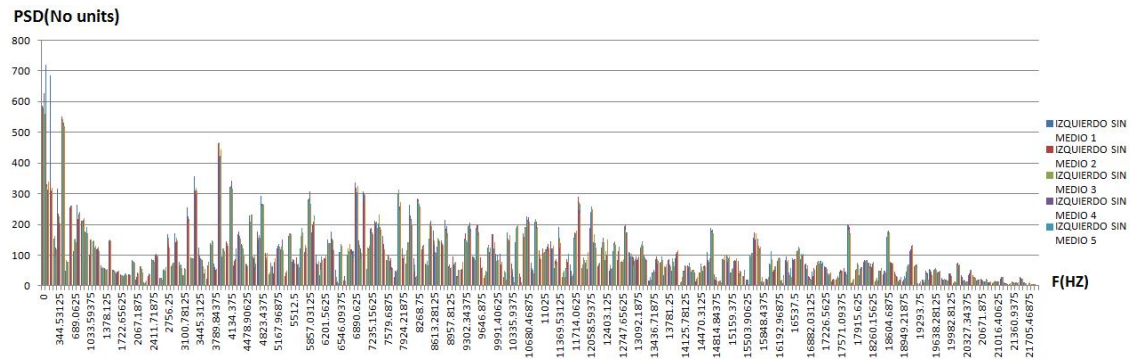


Figura 34: Modelado del canal izquierdo sin unidad de medios.

Para visualizar las afecciones respecto al modelo promedio ideal graficado en la Figura 19, se grafica el promedio de la respuesta del canal sin la unidad de medios versus el promedio ideal, teniendo como resultado la Figura 35.

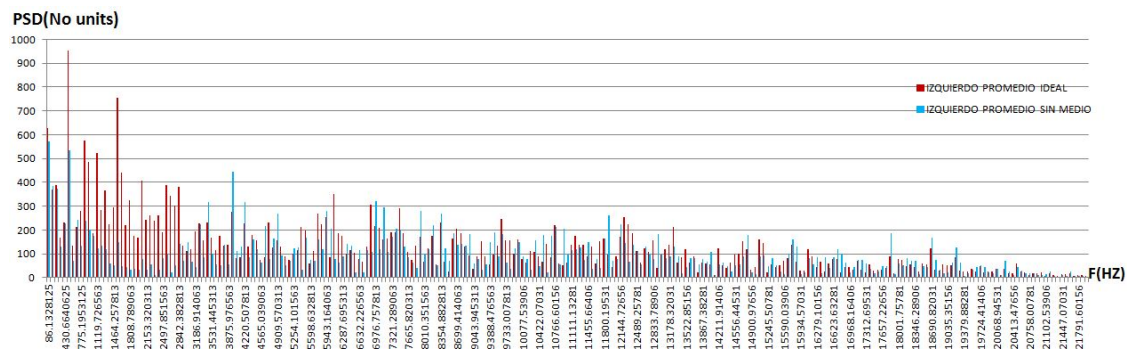


Figura 35: Promedio del canal izquierdo ideal vs promedio del promedio del canal izquierdo sin unidad de medios.

Se observa en la Figura 35 como las frecuencias comprendidas entre los 600 Hz y los 3000 Hz, son reducidas significativamente, reflejando la ausencia de la unidad de medios.

2.3.5 Canal central sin unidad de medios

El mismo procedimiento de desconectar la unidad de medios y obtener la PSD total es aplicado al canal central, 6 experimentos se grafican y se comparan con el promedio en condiciones ideales del canal central teniendo como resultado la Figura 36.

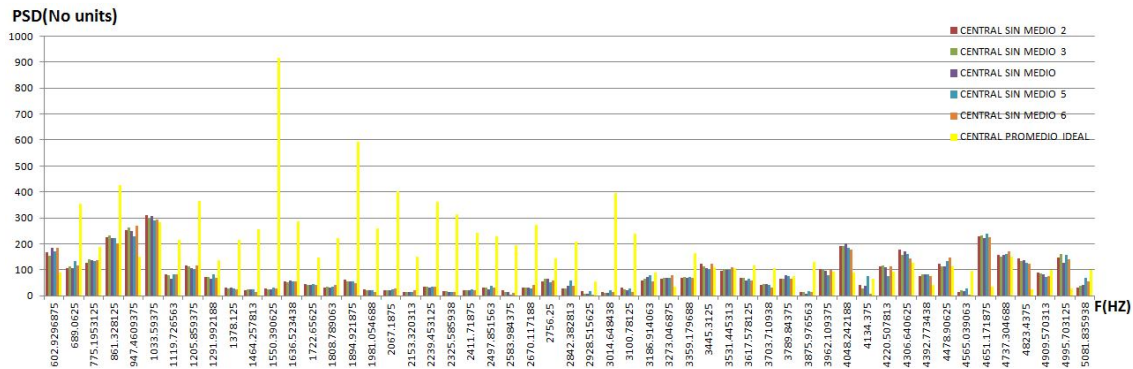


Figura 36: Modelado del canal central sin unidad de medios.

En la Figura 36 se omiten las frecuencias por abajo de 600 Hz y las frecuencias por arriba de 5100 Hz, para visualizar de una mejor manera los efectos producidos por la ausencia de esta unidad en las frecuencias en las que opera. Se observa que a partir de 3,100 Hz, el comportamiento es prácticamente igual al modelo en condiciones ideales, pero en el rango de 689 Hz a 3,100 Hz, las frecuencias se ven reducidas drásticamente, reflejando la ausencia de la unidad de medios en el canal, por lo que la sumatoria PSD_M se ve reducida a niveles que permiten al algoritmo distinguir el error.

2.3.6 Canal derecho sin unidad de medios

Al igual que los otros dos canales frontales, el mismo modelado es aplicado, teniendo como resultado la Figura 37

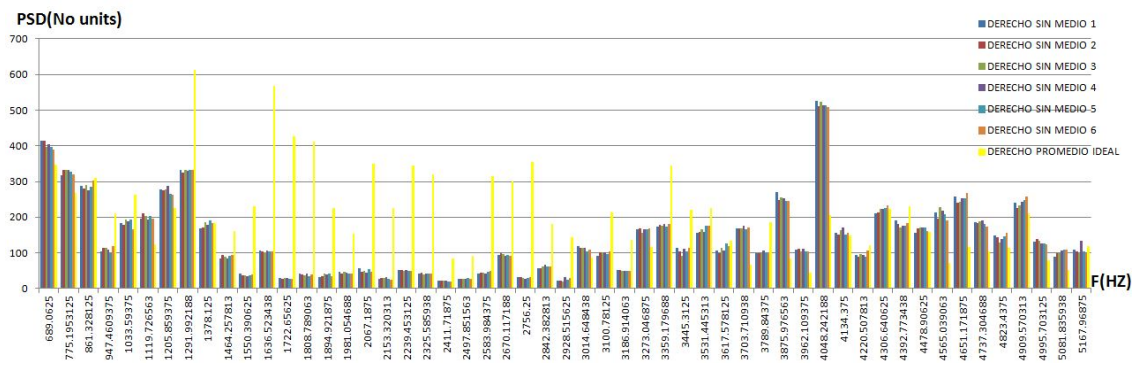


Figura 37: Modelado del canal derecho sin unidad de medios.

La Figura 37 muestra las frecuencias entre los rangos de 690 Hz y 5,168 Hz, pudiendo distinguirse en amarillo el promedio ideal de todas estas frecuencias, y observándose con claridad las frecuencias que decrecen sin la unidad de

medios correspondientes, reduciendo por consecuencia la PSD_M , tal como lo refleja la tabla 4 en donde se pueden observar los valores de cada banda y la caída respecto a los valores ideales de PSD_M en los tres canales frontales.

SPL \approx 83.6dB	PSD $\sum_{k=1}^{255} G \cdot X(k)$	PSD_L $\sum_{k=1}^6 G \cdot X(k)$	TSD_M $\sum_{k=7}^{57} G \cdot X(k)$	PSD_H $\sum_{k=58}^{255} G \cdot X(k)$
LEFT	25135	2223	6031	16881
CENTER	18179	2185	4100	11894
RIGHT	29115	2635	7268	19212

Tabla 4: Frontal Channels With No Midrange Driver PSD Average Values.

2.3.7 Canal izquierdo sin unidad de altos

En la Figura 38 se observa la respuesta al procesamiento de la FFT de la respuesta al ruido blanco del canal sin la unidad de altas frecuencias, o bien la PSD total. Se observa en la gráfica que al no contar con unidad de altos, las frecuencias arriba de 3,000 Hz, prácticamente desaparecen lo que afecta la magnitud de la PSD y la PSD_H .

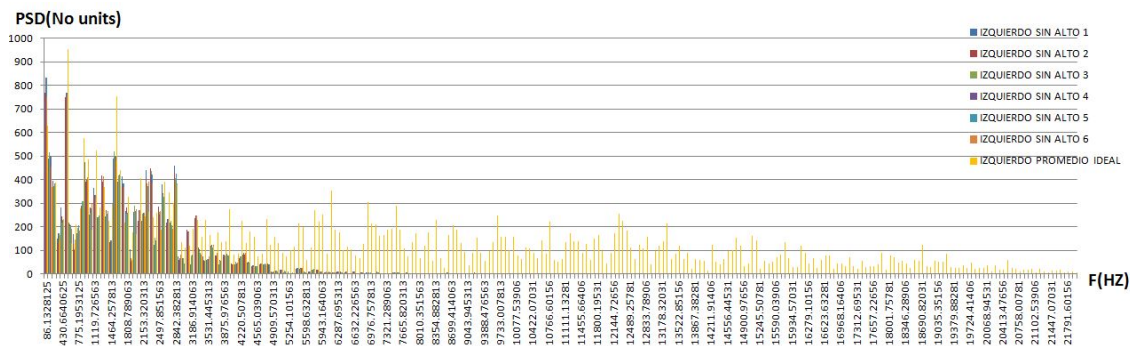


Figura 38: Modelado del canal izquierdo sin unidad de altos.

2.3.8 Canal central sin unidad de altos

Tal como se esperaba después de analizar el resultado al inducir el error de no tener unidad de frecuencias altas en el canal central, la respuesta fue prácticamente que la presentada en el canal izquierdo, el espectrograma de la respuesta del canal se muestra en la Figura 39.

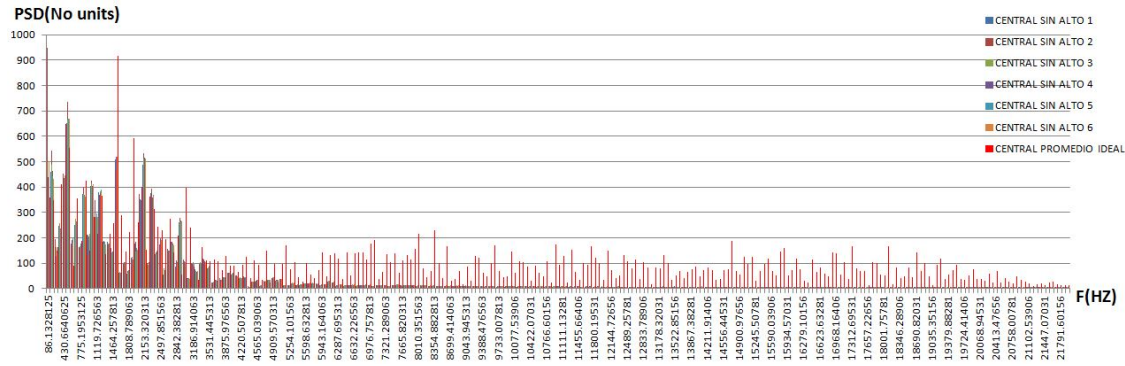


Figura 39: Modelado del canal central sin unidad de altos.

2.3.9 Canal derecho sin unidad de altos

El mismo caso que los dos canales frontales ya analizados presenta el tercer canal frontal, el derecho, en donde todas las frecuencias arriba de los 3,000 Hz decrecen, y arriba de los 5,000 Hz, prácticamente desaparecen, tal cual lo ilustra la Figura 40.

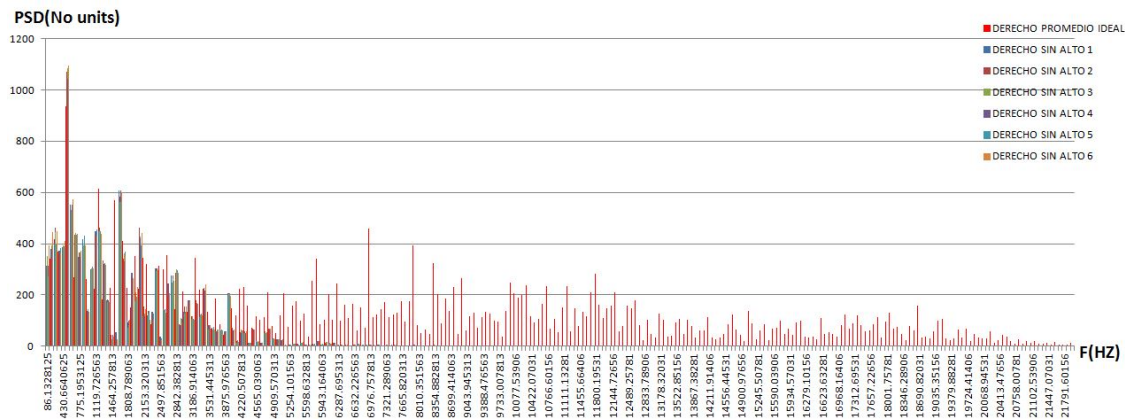


Figura 40: Modelado del canal derecho sin unidad de altos.

La reducción de la magnitud de la región de frecuencias altas al inducir la falla de falta de unidad de altos en los 3 canales frontales, es posible visualizarla en la tabla 5, que al comparar las magnitudes obtenidas en condiciones ideales y con la falla inducida para el valor de PSD_H , presenta una disminución drástica en magnitud.

	PSD	PSD_L	TSD_M	PSD_H
$SPL \approx 82.3dB$	$\sum_{k=1}^{255} G \cdot X(k)$	$\sum_{k=1}^6 G \cdot X(k)$	$\sum_{k=7}^{57} G \cdot X(k)$	$\sum_{k=58}^{255} G \cdot X(k)$
LEFT	12638	2768	9442	428
CENTER	11652	2500	7380	1772
RIGHT	12517	2979	9170	369

Tabla 5: Frontal Channels With No Highrange Driver TSD Average Values.

2.4 MODELADO CANALES SURROUND

Para el modelado de ambos canales de surround, el procedimiento empleado para los canales frontales fue replicado para obtener un modelo espectral, es decir, se verificó físicamente el estado de todas las unidades y bocinas empleadas en el canal, en éste caso 4 bocinas triamplificadas conectadas en un arreglo serie-paralelo para el canal Surround izquierdo (Sl) y 4 bocinas triamplificadas en el mismo arreglo serie-paralelo para el canal Sourround derecho (Sr). Una vez verificadas las bocinas y unidades, se calibraron de acuerdo a los niveles de SPL marcado por el estándar (83dB) mediante ruido rosa, se emitió en el prototipo el ruido blanco generado por el algoritmo desarrollado, se amplificó y se reprodujo para cada uno de los canales por separado, la respuesta fue grabada esta vez en dos posiciones, para el canal Sl, se utilizó la misma posición que se empleo para los canales frontales denominada como posición 1 y una nueva posición denominada posición 2. Ambas posiciones son descritas e ilustradas en el Capítulo ??, en la Figura ?. Para el canal Sr, también son utilizadas dos posiciones tanto para el modelado como para la inducción de fallas del canal, la misma posición 1, y la posición 3, descritas e ilustradas en el Capítulo ??, en la Figura ?.

Como fue mencionado en el Capítulo ??, y se reafirma en esta sección, las posiciones adicionales (2 y 3) utilizadas para el modelado de los canales Surround, tienen como objetivo ser un respaldo en el análisis y correcto desarrollo del proyecto para el caso de que la posición 1 sea incorrecta para captar en totalidad y en parámetros adecuados la respuesta de éstos canales por encontrarse en posición lateral de las bocinas de ambos canales de Surround, y por tener más cercanía a las bocinas 4 y 3 mostradas en la Figura ?? y la Figura ?? del Capítulo ??, aunque sabiendo que los micrófonos son omnidireccionales, la hipótesis plantea que la posición 1 es suficiente para diagnosticar de manera efectiva las condiciones de todo el sistema.

2.4.1 Modelado ideal canal Surround Izquierdo

Habiéndose habilitado en perfectas condiciones físicas de las bocinas el canal SI y ajustado con la descrita curva X, se procede a emitir el ruido blanco a 83dB por medio de la amplificación a través del canal, y se adquiere la respuesta del mismo en la posición 1 del micrófono de grabación, repitiendo 30 veces el experimento, y registrándose los resultados en una base de datos para ser analizada de manera estadística. La Figura 41 muestra la respuesta promedio del canal SI en condiciones ideales, formándose un modelo ideal magnitud vs frecuencia de la respuesta del canal al ruido blanco.

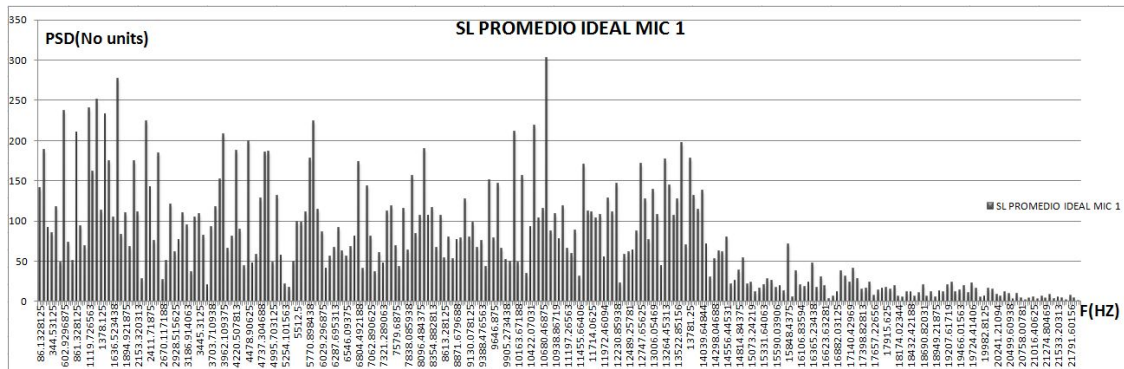


Figura 41: Modelado del canal SI promediado en condiciones ideales con el micrófono de grabación en posición 2.

Una vez obtenido el modelo para el canal con el micrófono en posición 1, se repite el mismo procedimiento para obtener el mismo modelado, pero ahora con el micrófono en posición 2, obteniéndose el modelo ilustrado en la Figura 42.

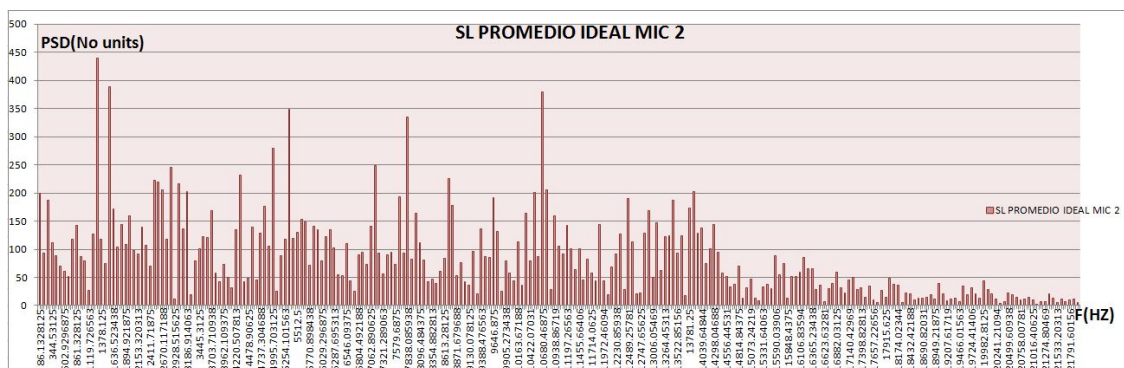


Figura 42: Modelado del canal SI promediado en condiciones ideales con el micrófono de grabación en posición 2.

Haciendo un comparativo de los modelos obtenidos en ambas posiciones, se observa en la Figura 43 las diferencias entre ambos modelos.

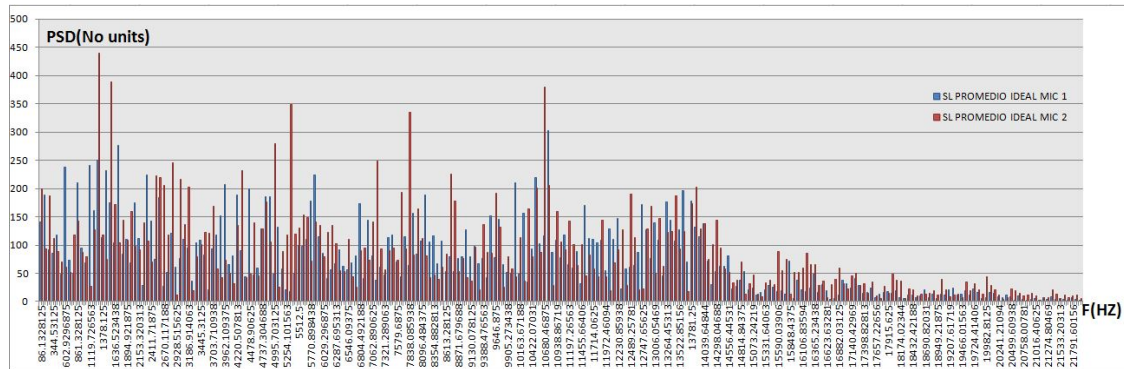


Figura 43: Comparativo en ambas posiciones del modelado del canal SI promediado en condiciones ideales.

Aplicando el mismo procedimiento de análisis que en los canales frontales, se procede a obtener la PSD, la PSD_L , la PSD_M y la PSD_H . Los resultados del canal en ambas posiciones se muestran en la Tabla 6.

	PSD_L	PSD_M	PSD_H	PSD
PSD(No units)	$\sum_{k=1}^6 G \cdot X(k)$	$\sum_{k=7}^{57} G \cdot X(k)$	$\sum_{k=58}^{255} G \cdot X(k)$	$\sum_{k=1}^{255} G \cdot X(k)$
	LEFT SURROUND			
MIC POS 1	673	6224	12208	19105
MIC POS 2	751	6405	14247	21404

Tabla 6: Left Surround Channel Average PSD Values.

Visualizando las gráficas del canal SI y la tabla de los valores obtenidos para las densidades espectrales total y tonales, se observa que la diferencia entre la posición de micrófono 1 y la posición de micrófono 2, radica en la potencia obtenida para las frecuencias bajas y medias. Como es de esperarse, al ser las frecuencias bajas las más afectadas durante su trayectoria en el espacio, y al no tener una trayectoria directa en la posición 1 como en la posición 2, la PSD_L obtenida en la posición de micrófono 1 disminuye considerablemente respecto a la PSD_L obtenida con el micrófono en la posición 2 y varía muy poco en PSD_M . Sin embargo, las frecuencias altas presentan el mismo comportamiento, y se observa que prácticamente no sufren ninguna afectación considerable como lo demuestran la PSD_H vistas en la Tabla 6 y en la Figura 43.

Por los motivos expuestos en el párrafo anterior, y dado que la posición empleada para obtener los modelos de los canales frontales y subwoofer es la del micrófono en posición 1, se observa que la afectación por grabar la respuesta de los canales de Surround con el micrófono en la posición 1 no es significativa, y es suficiente para diagnosticar de manera correcta el estado del sistema, por lo que para el modelado del canal Sr ya no es empleada la posición de micrófono 3 para obtener los modelos, siendo utilizada únicamente la posición de micrófono 1.

2.4.2 Modelado ideal canal Surround Derecho.

Habiendo habilitado físicamente el canal Surround izquierdo y ajustado a los parámetros correspondientes, se procede a repetir el proceso de modelado ideal que en los canales anteriores, es decir, emitiendo ruido blanco a la SPL equiparable que marca la curva x para el nivel del canal (82dB), y se obtiene la respuesta del canal con el micrófono de grabación en la posición 1, repitiéndose 30 veces los experimentos y haciendo una base de datos estadística. Al realizar estos procedimientos el modelado que se obtiene se ilustra en la Figura 44 con el promedio de todos los experimentos.

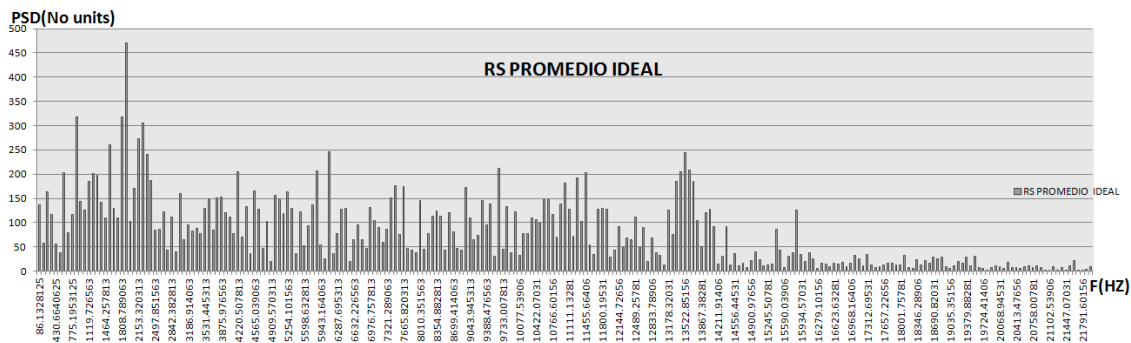


Figura 44: Modelo espectral del canal SR promediado en condiciones ideales.

Los resultados de las Potencias Espectrales se muestran en la Tabla 7

PSD(No units)	PSD_L $\sum_{k=1}^6 G \cdot X(k)$	PSD_M $\sum_{k=7}^{57} G \cdot X(k)$	PSD_H $\sum_{k=58}^{255} G \cdot X(k)$	PSD $\sum_{k=1}^{255} G \cdot X(k)$
RIGHT SURROUND				
	568	7332	12490	20390

Tabla 7: Right Surround Channel Average PSD Values.

2.4.3 Inducción de fallas en canal SI

Una vez que se obtuvo el modelo espectral ideal, se procede a obtener los modelos para cada falla inducida, que en este caso será la ausencia de las bocinas 1, 2, 3 y 4, ilustradas en la Figura ??, además se induce la falla de falta de unidad de bajos en cada bocina y se obtienen las respuestas espectrales para cada falla repitiendo 30 veces cada experimento. Para el canal SI, se realiza la experimentación con las dos posiciones de micrófono.

2.4.4 Canal SI sin bocina 1

En la Figura 45 se muestra el resultado del promedio de la base de datos obtenida después de repetir el experimento 30 veces cuando el canal sufre la ausencia de la bocina 1, se compara con el promedio de la respuesta del canal en condiciones ideales.

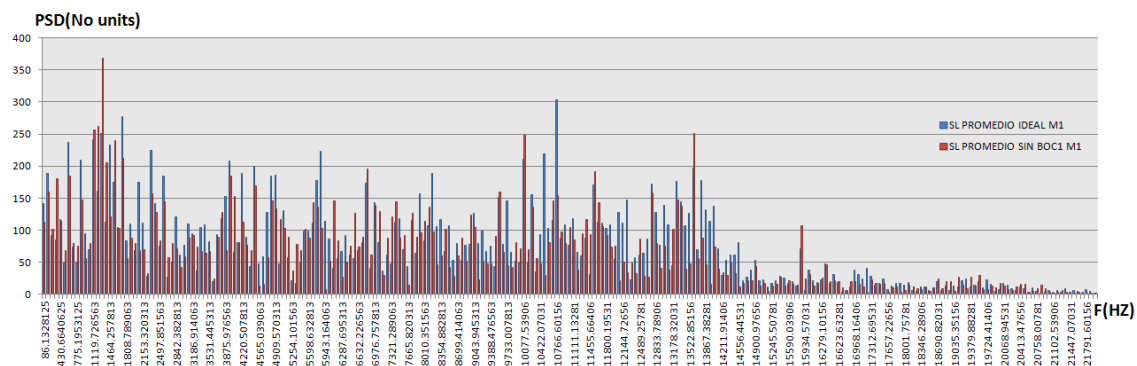


Figura 45: Modelo espectral del canal SI sin bocina 1, grabado con el micrófono en posición 1.

De igual manera, se obtiene la misma respuesta del canal sin la misma bocina, pero ahora visto desde la posición de micrófono 2, nuevamente se hace la comparación del canal SI en condiciones ideales, también visto desde la posición de micrófono 2, todo esto se grafica en Figura 46.

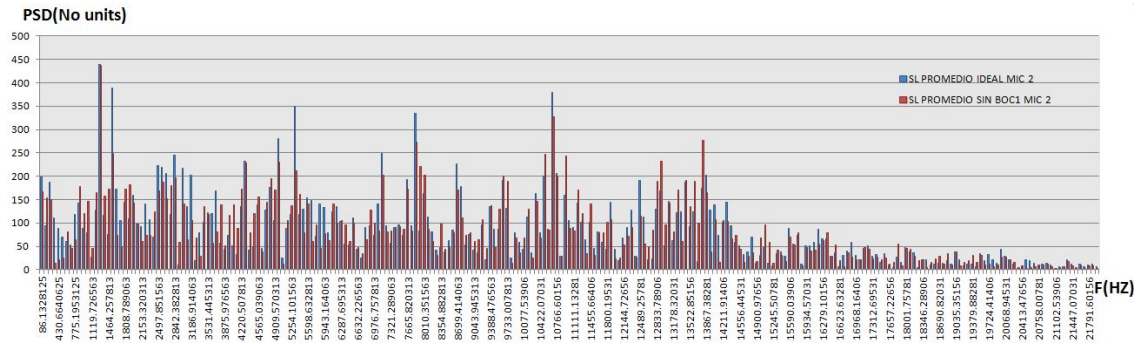


Figura 46: Modelo espectral del canal Sl sin bocina 1, grabado con el micrófono en posición 2.

2.4.5 Canal Sl sin bocina 2

La Figura 47 muestra la respuesta del canal sin la bocina 2 después de promediar los resultados obtenidos adquiridos por el micrófono de grabación en posición 1. La respuesta es nuevamente comparada con el promedio ideal del canal, grabando en posición 1 del micrófono.

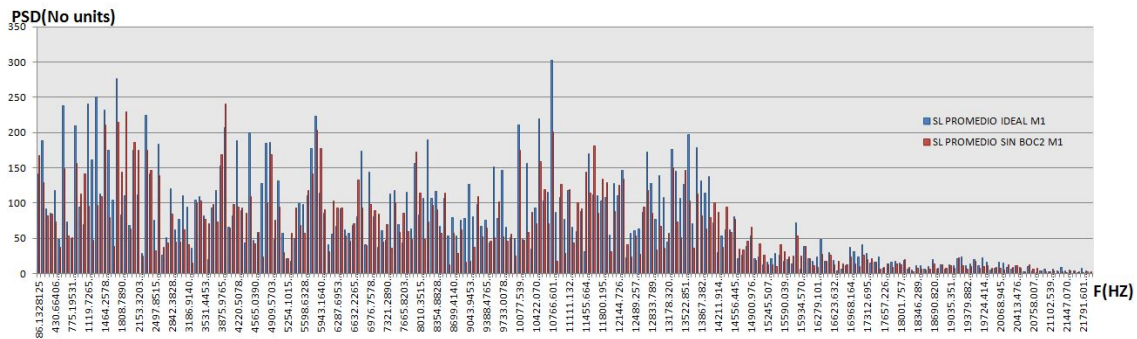


Figura 47: Modelo espectral del canal Sl sin bocina 2, grabado con el micrófono en posición 1.

En la gráfica de la Figura 48 se observa la comparativa de la respuesta del canal sin la bocina 2 grabado con el micrófono en posición 2, y comparada con el promedio ideal en la misma posición.

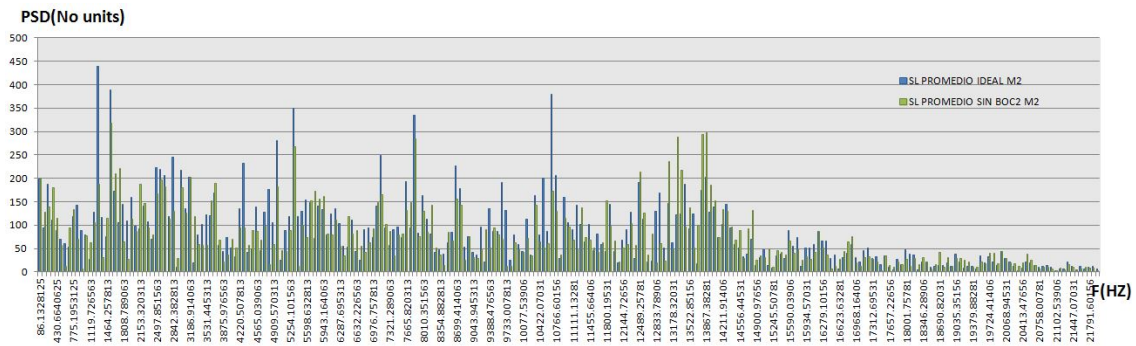


Figura 48: Modelo espectral del canal SI sin bocina 2, grabado con el micrófono en posición 2.

2.4.6 Canal SI sin bocina 3

Al igual que en los casos anteriores, la Figura 49 hace la comparativa respecto al promedio ideal obtenido de la grabación con el micrófono en posición 1.

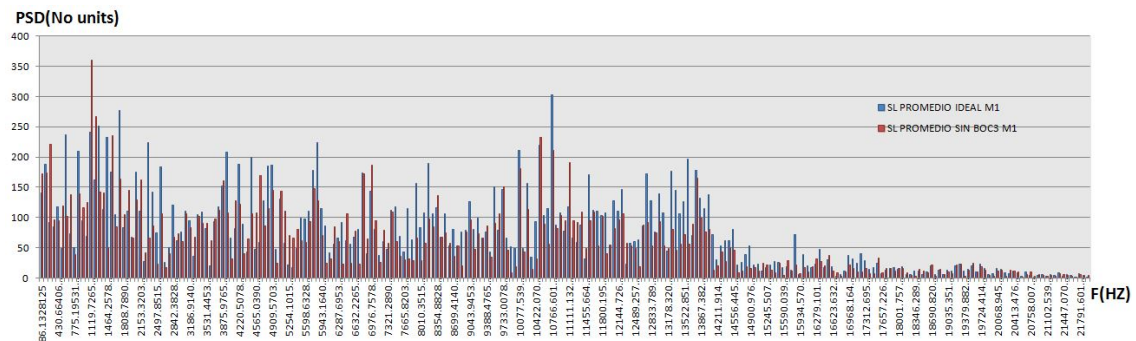


Figura 49: Modelo espectral del canal SI sin bocina 3, grabado con el micrófono en posición 1.

La gráfica Figura 50 compara los modelos ideales y la ausencia de bocina 3, con el micrófono en posición 2.

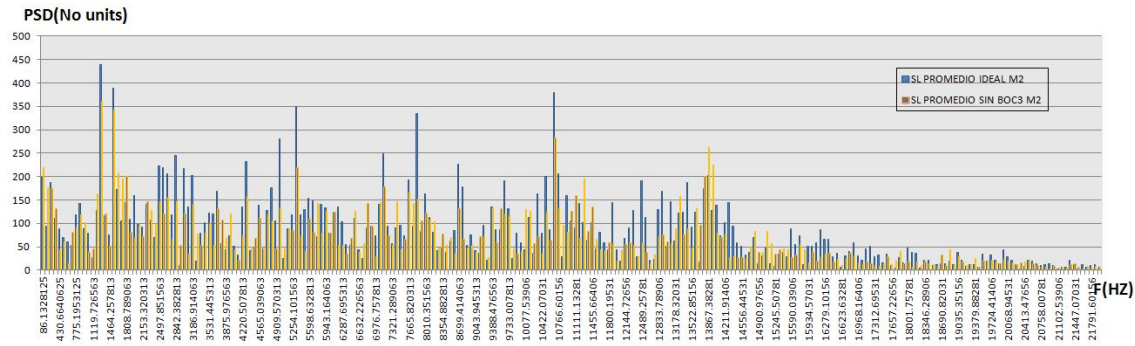


Figura 50: Modelo espectral del canal Sl sin bocina 3, grabado con el micrófono en posición 2.

2.4.7 Canal Sl sin bocina 4

La Figura 51 ilustra las diferencias obtenidas al comparar el modelo del canal en condiciones ideales, y el modelo sin la bocina 4 con el micrófono de grabación en posición 1.

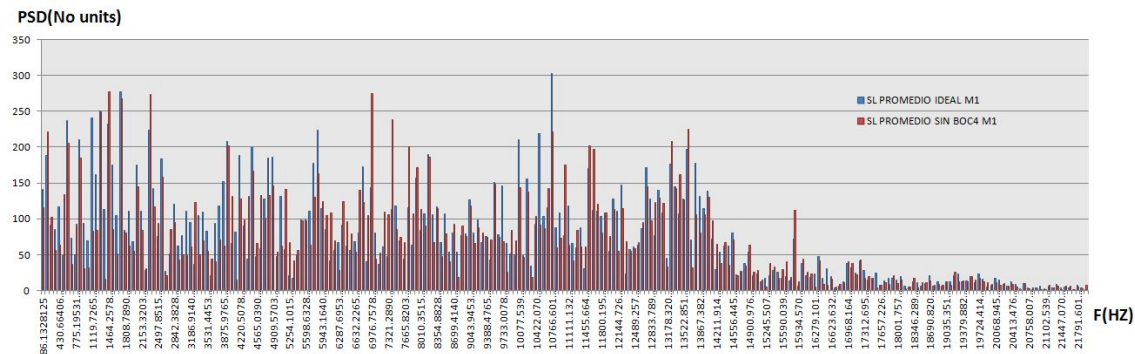


Figura 51: Modelo espectral del canal Sl sin bocina 4, grabado con micrófono en posición 1.

A la par se tiene la respuesta del canal con el micrófono en posición 2, y se muestra en la Figura 52.

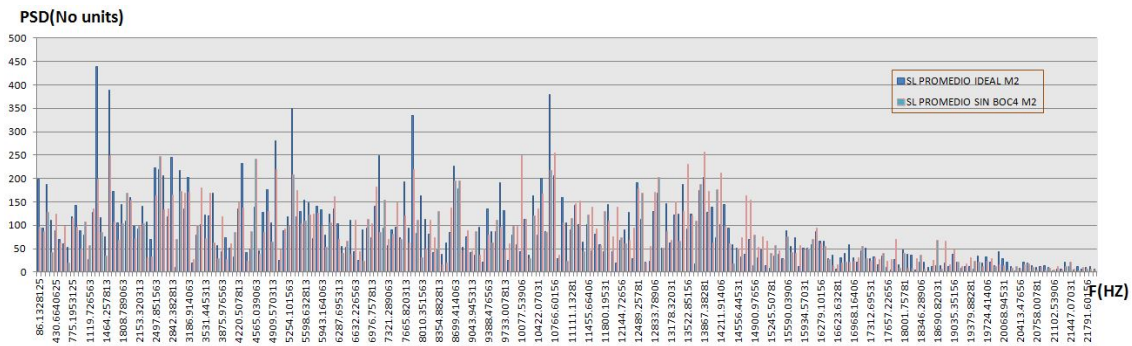


Figura 52: Modelo espectral canal SI sin bocina 4, grabado con el micrófono en posición 2.

2.4.8 Canal SI sin unidad de bajos.

Una vez que se obtuvieron los modelos del canal SI al desactivar cada una de las bocinas que conforman el canal, se indujo la falla de no contar con unidad de bajos en una de las bocinas del canal, se obtiene nuevamente el modelo espectral a la respuesta de esta falla en el canal con el micrófono de grabación colocado tanto en la posición de grabación 1, como en la posición de grabación 2.

La falta de unidad de bajo se induce primero en la bocina con posición 1 ilustrada en Figura ??, y después de emitir el ruido blanco se graba la respuesta espectral con el micrófono en la posición 1. En la Figura 53 se muestra la respuesta promedio de éste experimento.

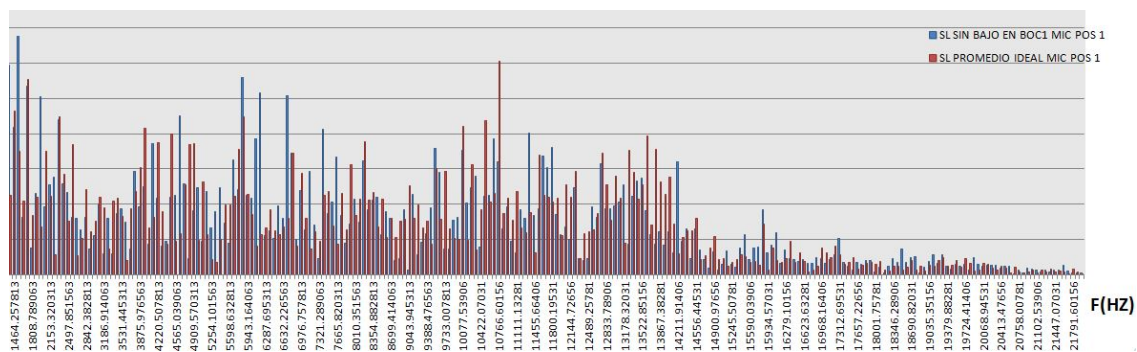


Figura 53: Modelo espectral del canal SI sin unidad de bajos en la bocina 1, grabado con el micrófono en posición 1.

Ahora el micrófono se coloca en la posición 2 se emite el ruido blanco, se graba y se obtiene la respuesta espectral promedio mostrada por la Figura 54 y comparada con la respuesta ideal del canal.

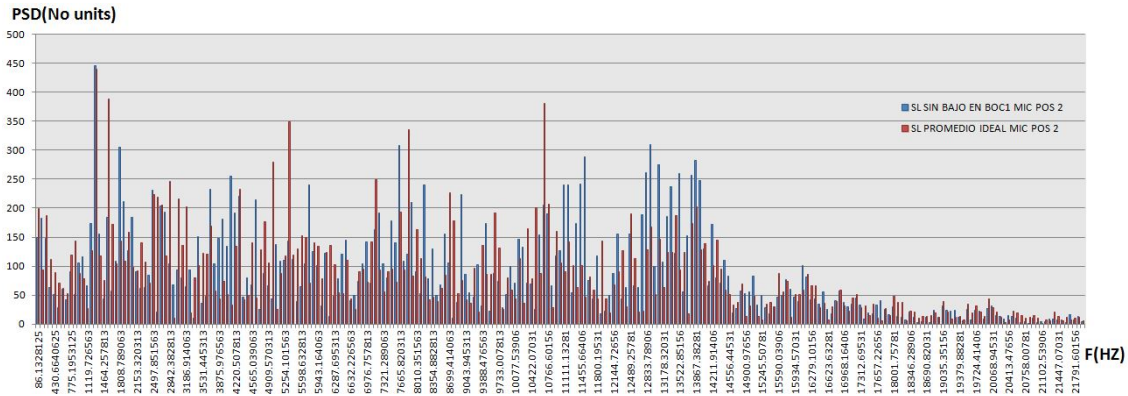


Figura 54: Modelo espectral del canal SI sin unidad de bajos en la bocina 1, grabado con el micrófono en posición 2.

Tratando de obtener un mejor panorama de la afectación que la falta de la unidad de bajos en una bocina pueda generar a todo el canal SI, se regresa la conexión de la unidad de bajos en la bocina 1, quedando perfectamente operable, y ahora se induce la misma falla en la bocina 2 del canal. Se repiten los mismos procedimientos para obtener el modelo espectral, al grabar con el micrófono en posición 1, la respuesta promediada se muestra en el modelo espectral ilustrado en la Figura 55.

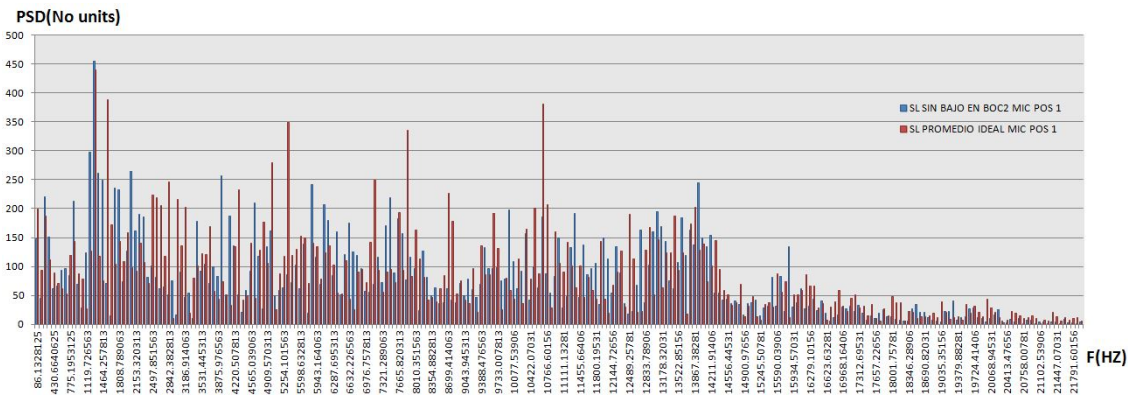


Figura 55: Modelo espectral del canal SI sin unidad de bajos en la bocina 2, grabado con el micrófono en posición 1.

Cambiando la posición del micrófono de la posición 1 a la 2, se repite el procedimiento y se obtiene la respuesta promedio que se puede observar en la Figura 56.

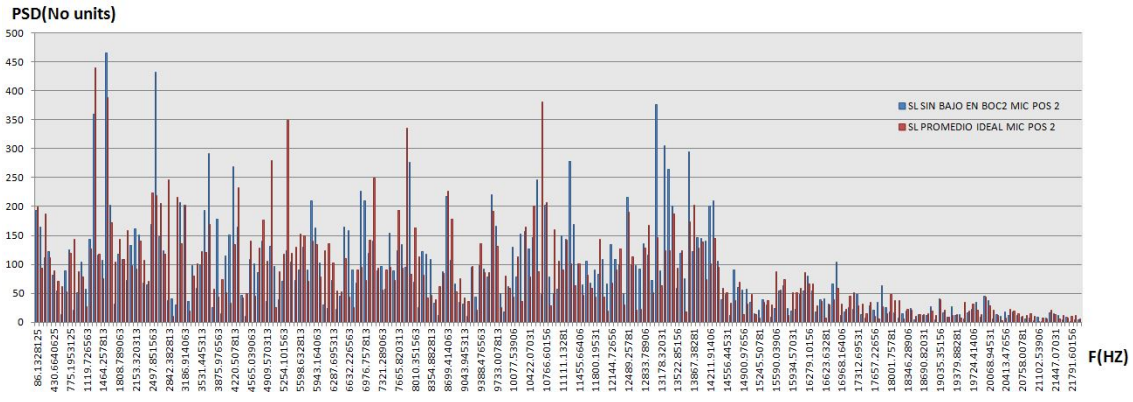


Figura 56: Modelo espectral del canal SI sin unidad de bajos en la bocina 2, grabado con el micrófono en posición 2.

Ahora se vuelve a habilitar la bocina 2, y se desconecta la unidad de bajos de la bocina 3, primero se graba la respuesta al ruido blanco con el micrófono en la posición 1, y se obtiene la respuesta frecuencial promedio mostrada en la Figura 57.

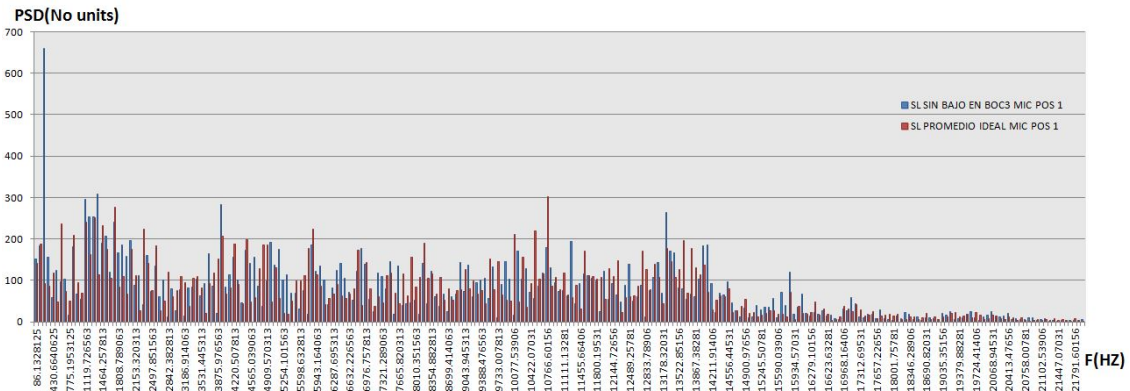


Figura 57: Modelo espectral del canal SI sin unidad de bajos en la bocina 3, grabado con el micrófono en posición 1.

Para inducir la falla solamente en la bocina 4 del canal SI, se habilita la bocina 3 y ahora se desconecta la unidad de bajos de la bocina 4, se obtiene el modelo espectral desde la posición 1 del micrófono y se muestra el promedio en la Figura 58.

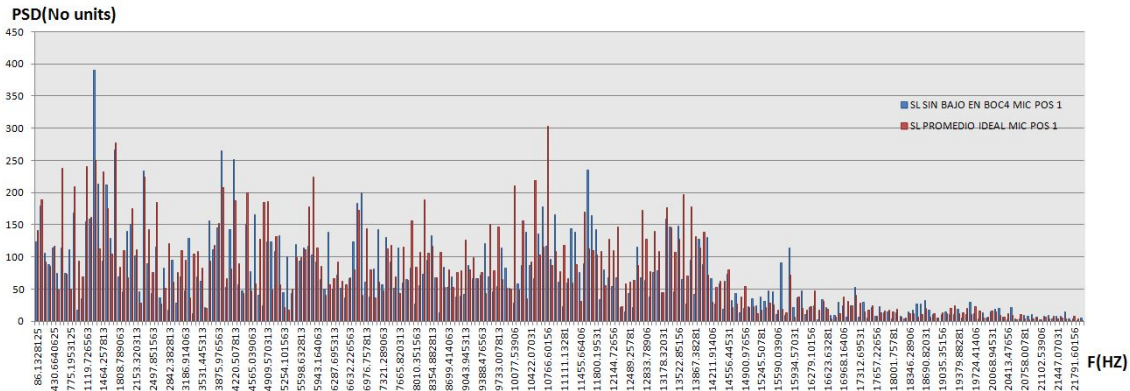


Figura 58: Modelo espectral del canal SI sin unidad de bajos en la bocina 4, grabado con el micrófono en posición 1.

Finalmente para la inducción de fallas en el canal SI, se cambia de posición el micrófono de grabación, ahora colocado en posición 2, y se vuelve a emitir el ruido para grabar la respuesta del canal, obteniéndose la respuesta ilustrada en la Figura 59.

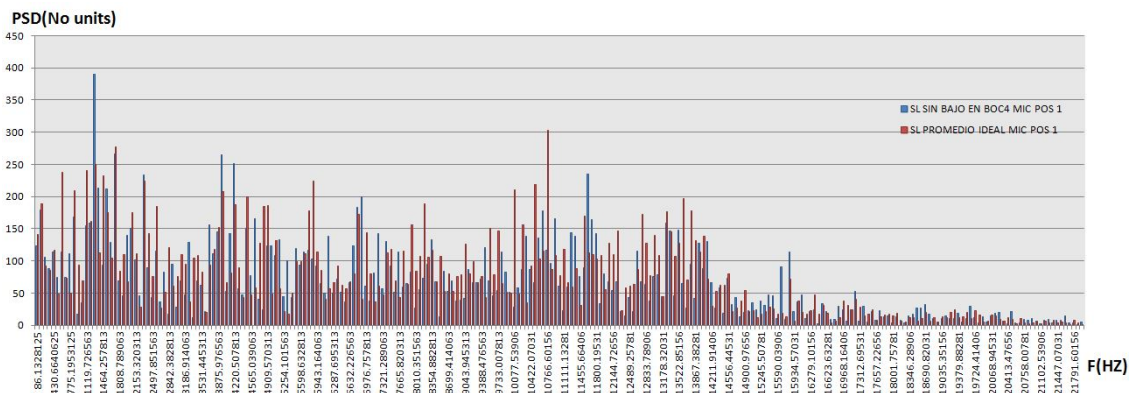


Figura 59: Modelo espectral del canal SI sin unidad de bajos en la bocina 4, grabado con el micrófono en posición 2.

Al analizar cada una de las respuestas, se observa que la ausencia de una bocina completa presenta una notable variación de la PSD total del canal, sin embargo, en las potencias tonales (PSD_L , PSD_M y PSD_H), no se percibe variación significativa, por lo que la potencia total es la única variable que permite diagnosticar este tipo de fallas con precisión, aunque, cuando existe ausencia de bocina 3 y bocina 4, los parámetros de PSD toman valores muy próximos, complicando determinar cual de las 2 bocinas es la ausente.

En el caso de la ausencia de una unidad en una sola bocina (en este caso, la unidad de bajos), se observa que hay 2 parámetros que varían en poca escala,

pero aportando una información bastante sustancial. Los parámetros son los de PSD y PSD_H , y se observa que estos parámetros aumentan al desconectar la unidad de bajos, particularmente PSD_H , de manera que analizando los datos en relación con los datos del modelo ideal, es posible determinar la ausencia de la unidad de bajos de alguna bocina, y dependiendo los rangos, es posible determinar en que bocina. Estos aumentos en la potencia total y la potencia del rango de las frecuencias bajas se debe a que las bocinas están conectadas en un arreglo serie-paralelo como el mostrado en la Figura 60, e internamente, cada bocina cuenta con una unidad de altos, una de medios y otra de bajos y cada una de estas unidades ésta conectada en paralelo a la fuente que alimenta a la bocina, mediante una etapa de filtrado, y cada etapa de filtrado cuenta con su impedancia, ésto lo podemos ver ilustrado en la Figura 61. La potencia que recibe cada bocina, si todas funcionan correctamente, es la misma en las 4 bocinas. Esta potencia es suministrada a las 3 unidades. Al desconectar la unidad de bajos, la impedancia de la bocina aumenta, por estar las 3 unidades conectadas en paralelo, recibiendo más potencia que solo es reproducida por la unidad de altos y medios, teniendo más energía ambas que viaja por el aire y es captada por el micrófono de grabación. Al ser las frecuencias altas las que mas aportan a la suma total de PSD, es captada más potencia por ser más aguda la respuesta que emite la bocina en cuestión.

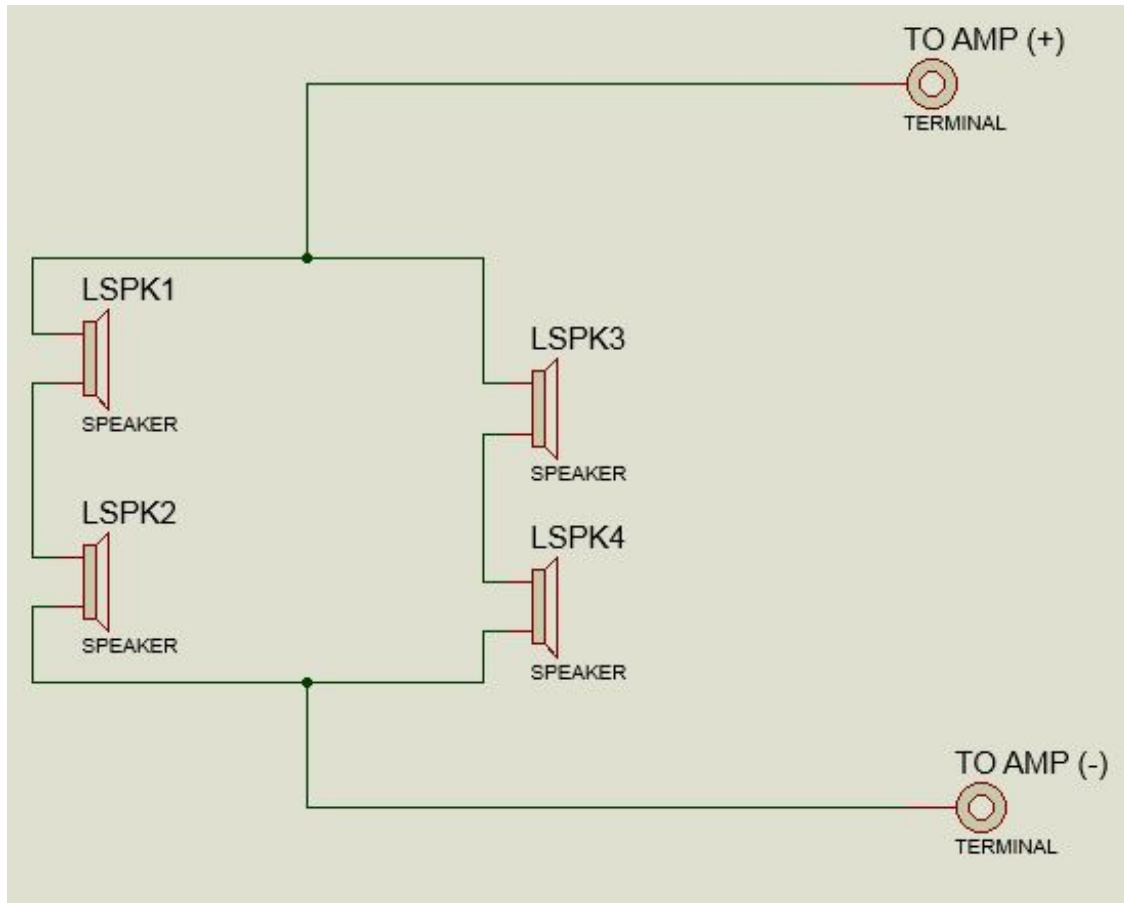


Figura 60: Circuito de conexión de canal de Surround.

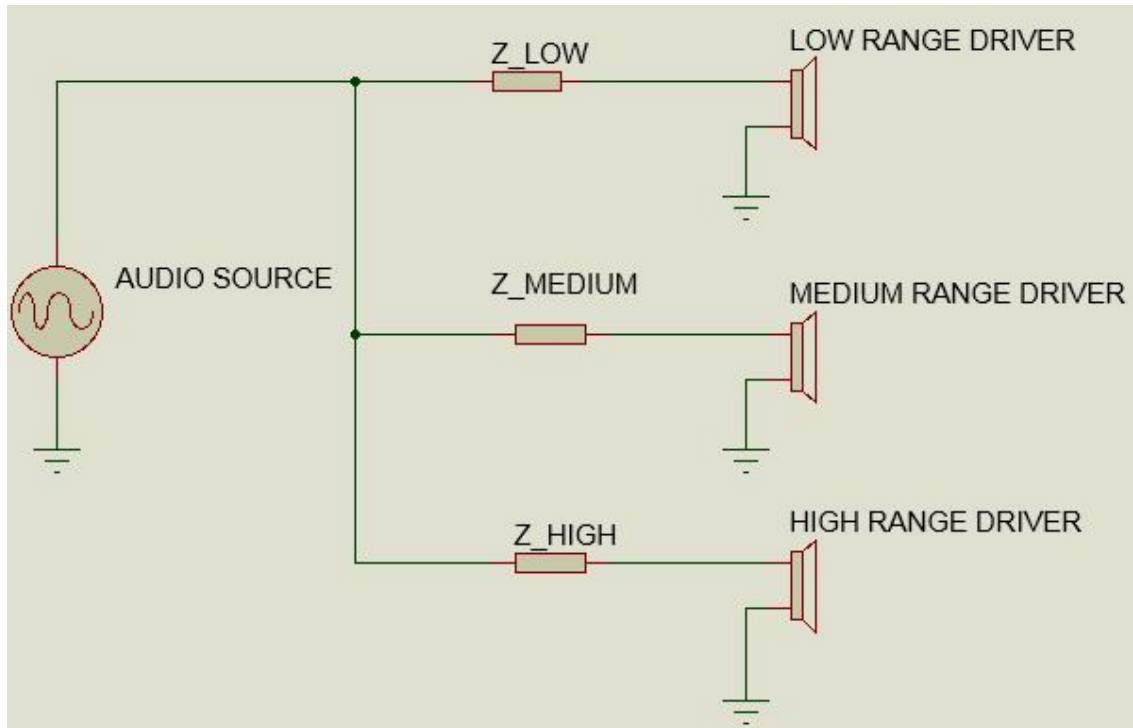


Figura 61: Circuito interno de una bocina triamplificada.

Los valores de cada región espectral del canal SL en condiciones ideales, e induciendo sus fallas correspondientes, es posible visualizarla en la Tabla 8.

PSD(No units)	PSD_L $\sum_{k=1}^6 G \cdot X(k)$	PSD_M $\sum_{k=7}^{57} G \cdot X(k)$	PSD_H $\sum_{k=58}^{255} G \cdot X(k)$	PSD $\sum_{k=1}^{255} G \cdot X(k)$
LEFT SURROUND				
IDEAL	673	6224	12208	19105
NO SPK_1	735	5566	10490	16791
NO SPK_2	572	5106	10272	15950
NO SPK_3	875	5487	9423	15785
NO SPK_4	692	5156	12340	18189
NO LOW DRIVER				
SPK_1	802	6398	12354	19554
SPK_2	691	6218	12938	19892
SPK_3	1335	6240	12066	19641
SPK_4	687	5648	10914	17249

Tabla 8: Left Surround Average PSD Values with ideal conditions, and failures induced.

2.4.9 Inducción de fallas en canal S_r

Después de obtener el modelado ideal del canal, se procedió a la inducción de fallas en el mismo, tomando la respuesta unicamente en la posición de grabación de micrófono 1, debido a que se apreció en la experimentación del canal S_l , que esta posición brinda un mejor reconocimiento de las fallas que la del micrófono 2, debido a que permite distinguir con mas claridad cada una de las bocinas por su posición en la sala.

La primer falla inducida fue la ausencia de la bocina 1 del canal, teniendo como resultado comparativo con la respuesta ideal, la mostrada por la Figura 62

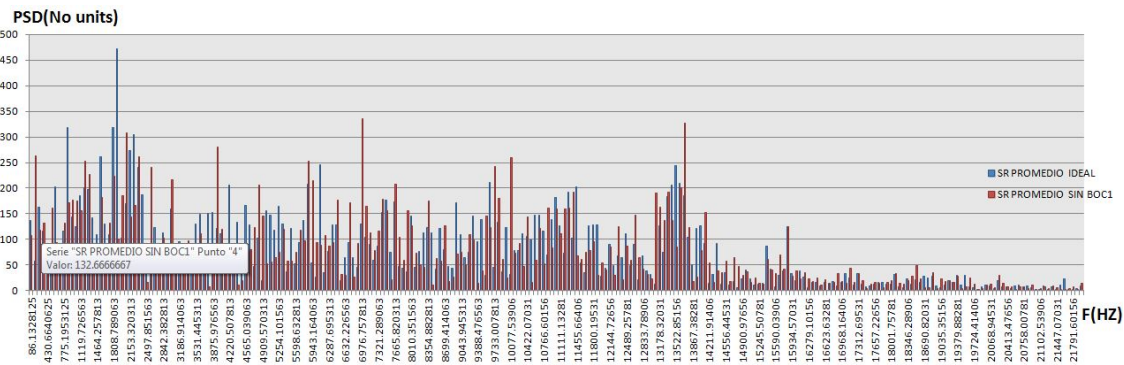


Figura 62: Modelo espectral del canal Sr sin bocina 1, grabado con micrófono en posición 1.

Posteriormente, se reconecta la bocina 1 y se desconecta la bocina 2, se corren las pruebas para obtener el modelo frecuencial del canal con la falla inducida, obteniéndose lo representado en la Figura 63.

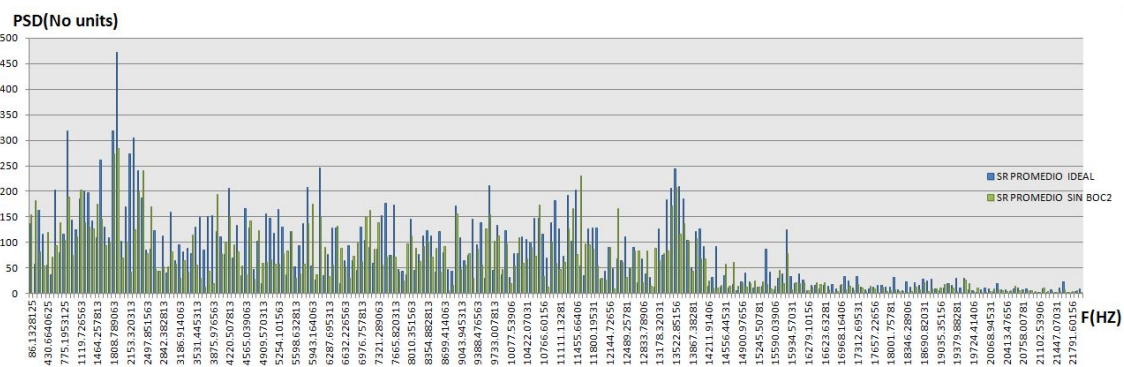


Figura 63: Modelo espectral del canal Sr sin bocina 2, grabado con micrófono en posición 1.

Una vez obtenida el espectrograma del canal sin la presencia de la bocina 2, se obtiene la respuesta sin conexión únicamente de la bocina 3, recavándose la información representada en la Figura 64.

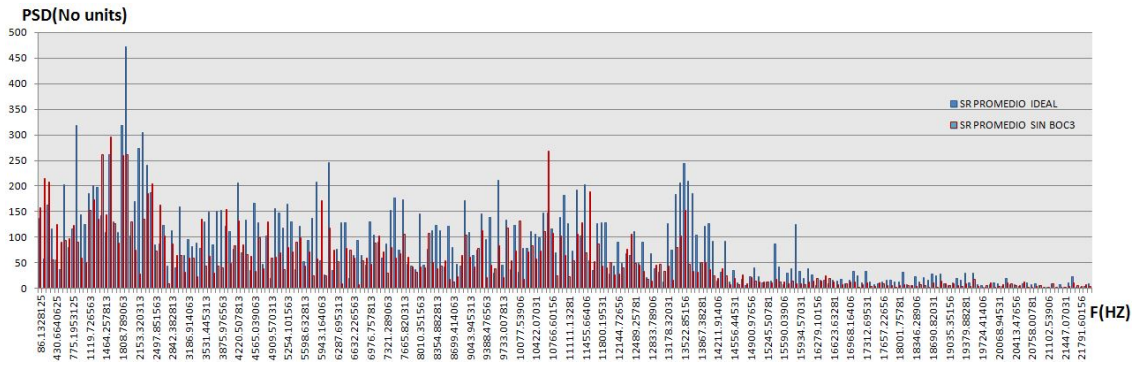


Figura 64: Modelo espectral del canal Sr sin bocina 3, grabado con micrófono en posición 1.

Finalmente, el mismo procedimiento es aplicado para obtener la respuesta del canal sin la presencia de la bocina 4, y la respuesta a esta falla es ilustrada en la Figura 65.

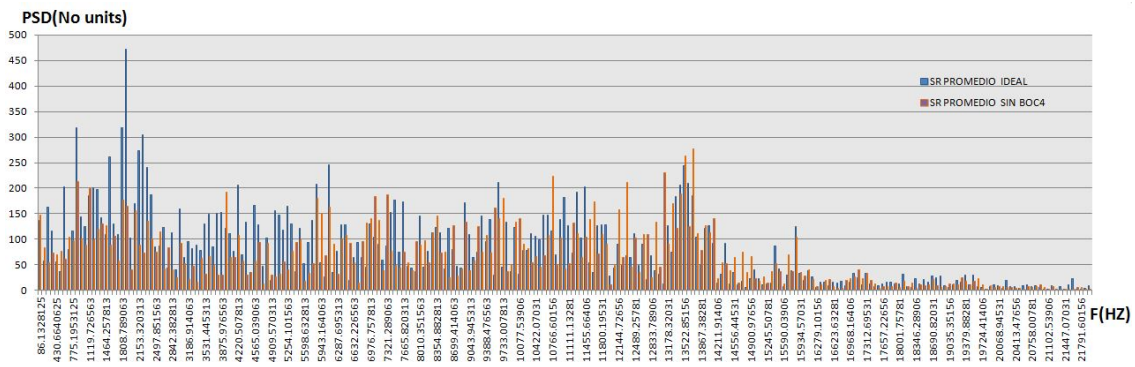


Figura 65: Modelo espectral del canal Sr sin bocina 4, grabado con micrófono en posición 1.

La extracción de datos del modelado a cada falla se puede observar en la Tabla 9

	PSD_L	PSD_M	PSD_H	PSD
PSD(No units)	$\sum_{k=1}^6 G \cdot X(k)$	$\sum_{k=7}^{57} G \cdot X(k)$	$\sum_{k=58}^{255} G \cdot X(k)$	$\sum_{k=1}^{255} G \cdot X(k)$
RIGHT SURROUND				
IDEAL	568	7332	12490	20390
NO SPK_1	839	6183	12823	19845
NO SPK_2	664	5303	9913	15879
NO SPK_3	851	5256	7669	13776
NO SPK_4	505	4242	12054	16801

Tabla 9: Right Surround Average PSD Values with ideal conditions, and failures induced.

Se observa que el comportamiento del canal Sr se comporta de manera análoga que el canal Sl, al ser inducidas las fallas propias de los canales surround, pudiendo diagnosticar de manera acertada las fallas más típicas en el.

2.4.10 Modelado canal Subwoofer

Al ser el subwoofer un subcanal incapaz de reproducir en su totalidad el espectro audible, solo cuentan con unidades que reproducen frecuencias entre 40 y 500Hz, una falla de las mismas producen la ausencia de canal, teniendo una respuesta nula en frecuencia. El modelado ideal del canal se hace con una SPL de 90 dB, y la respuesta en frecuencia se observa en la Figura 66.

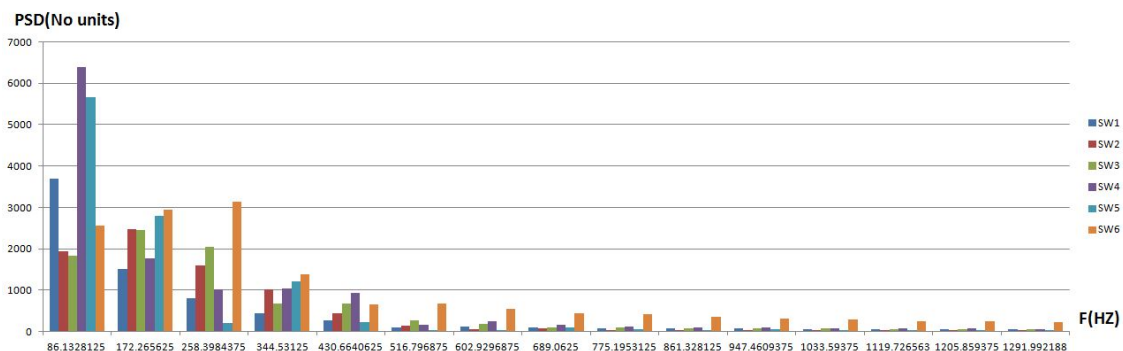


Figura 66: Modelo espectral del canal Sw grabado con micrófono en posición 1 en condiciones ideales.

2.4.11 Inducción de fallas canal Sw.

Para la inducción de fallas del canal solamente se disminuyó la SPL en 5 dB, para notar los rangos de operación con el sistema desarrollado. La falla de unidad dañada no se induce, dado que de ser de una sola unidad el subwoofer, esta es notada como la ausencia de canal, y el espectrograma es nulo, en caso de ser de 2 unidades el baffle, la potencia disminuye mas allá de los 5 dB, teniendo una referencia mas que idónea el bajar de 5 dB para notar una falla en el canal. La Figura 66, ilustra la diferencia entre los espectrogramas en condiciones ideales y con una potencia sonora ideal.

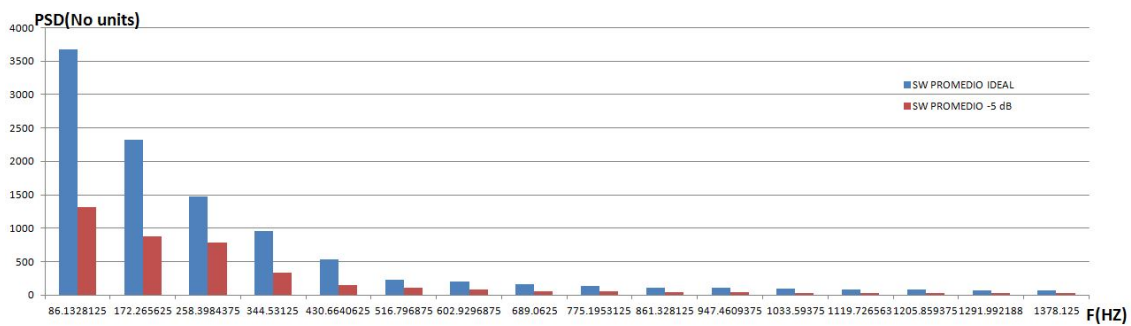


Figura 67: Modelo espectral del canal Sw grabado con micrófono en posición 1 con una SPL baja en 5 dB y comparada con el espectrograma en condiciones ideales.

Se observa que este canal es el mas sencillo de diagnosticar por no contar con todo el rango audible, no tener unidades de medios y altos, ser en la mayoría de las salas un baffle, y de ser mas, la ausencia de una unidad impacta radicalmente la SPL del canal.

Para determinar los valores característicos del canal, se obtiene la PSD total considerando el rango de frecuencias de 80 a 600 Hz, y los resultados se observan en la Tabla 10

PSD(No units)	$\sum_{k=1}^7 G \cdot X(k)$
IDEAL	12031
SPL 5 dB LOW	6525

Tabla 10: Subwoofer Average PSD Values with ideal conditions, and failures induced.

2.5 RESULTADOS

Después de haber realizado los experimentos para modelar los canales frontales en condiciones ideales y con fallas inducidas, y al concentrar los resultados arrojados al analizar las 4 variables principales de los 3 canales frontales, PSD , PSD_L , PSD_M y PSD_H , se puede visualizar en la Tabla 11 todas las magnitudes que permiten distinguir las diferencias entre cada etapa de la experimentación.

Se observa que para el caso de alta potencia sonora (SPL), las 4 variables se incrementan en un margen sustancial que permite dictaminar la falla.

Para el caso de baja SPL, las 4 variables decrecen en magnitud, facilitando el diagnóstico de ésta falla en particular.

En el caso de falta de unidad de bajos, en los 3 canales frontales, se ve una disminución notable de la magnitud de PSD , una poca disminución de la variable PSD_M , una nula disminución en PSD_H , pero una radical y determinante disminución en la variable PSD_L , que con ayuda de la variable PSD , permiten el diagnóstico de éste tipo de falla en los canales frontales.

Para el tipo de falla de falta de unidad de medios, se observa nuevamente disminución notable en PSD , una ligera disminución en PSD_L y PSD_H y una drástica y determinante disminución en PSD_M , que básicamente con los rangos de disminución con la Densidad de Potencia Espectral total y la Densidad Espectral de Medios, permiten diagnosticar ésta falla.

Cuando se intenta diagnosticar la falta de unidad de altos en algún canal frontal, al igual que en los casos anteriores, primero se atiende la magnitud de la Densidad de Potencia Espectral total del canal, PSD , si se detecta una disminución del umbral de operación ideal, se revisan las otras tres regiones. Se observa que prácticamente la región de frecuencias bajas PSD_L se mantiene sin alteraciones, se nota una disminución en la zona de medios, PSD_M , que no es determinante, pero al analizar la región de altos PSD_H se detecta una disminución radical de la magnitud, y sale del umbral de correcta operación, por lo que prácticamente ésta variable determina ésta falla.

PSD(No units)	PSD $\sum_{k=1}^{255} G \cdot X(k)$	PSD_L $\sum_{k=1}^6 G \cdot X(k)$	PSD_M $\sum_{k=7}^{57} G \cdot X(k)$	PSD_H $\sum_{k=58}^{255} G \cdot X(k)$
SPL(dB) $\approx 85db$	Ideal Conditions			
Left	33391	2737	6572	9872
Center	28422	2484	10280	15658
Right	32826	2513	11080	19233
SPL(dB) $\approx 83dB$	Low SPL Induced			
Left	25070	1958	9449	13663
Center	22164	1891	7646	12627
Right	625543	1948	8524	15072
SPL(dB) $\approx 86dB$	High SPL Induced			
Left	38006	3115	13918	20973
Center	31816	2778	11883	17155
Right	35608	2738	11512	21358
SPL(dB) $\approx 84dB$	Without Lowrange Driver			
Left	28513	513	10285	17715
Center	19666	338	7143	12186
Right	29211	462	9442	19307
SPL(dB) $\approx 83,6dB$	Without Midrange Driver			
Left	25135	2223	6031	16881
Center	18179	2185	4100	11894
Right	29115	2635	7268	19212
SPL(dB) $\approx 82,3dB$	Without Highrange Driver			
Left	12638	2768	9442	428
Center	11652	2500	7380	1772
Right	12517	2979	9170	369

Tabla 11: Frontal Channels Average PSD Modelling.

En la Figura 68 se puede observar de manera gráfica los resultados tabulados en la Tabla 11 para el canal central, en ella se puede observar la comparativa de

condiciones ideales y las fallas inducidas en el mismo canal, el comportamiento de los otros canales L y R, presentan el mismo comportamiento del canal central en condiciones ideales y con fallas inducidas.

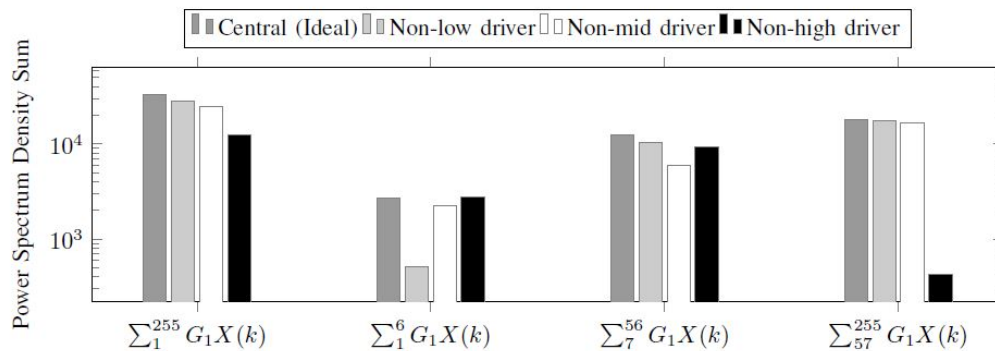


Figura 68: Frontal-Central Speaker Power Spectrum Density Sums for Ideal conditions, No lowrange driver, No midrange driver, No highrange driver.

Por lo tanto, se observa que el método desarrollado es perfecto para dictaminar todas las fallas que pueden presentarse en los canales frontales que además son los canales de mayor trascendencia en la sala cinematográfica.

Para el análisis de los canales de surround, tanto en condiciones ideales como con fallas inducidas, la Tabla 12 extra las características esenciales de los modelos, y permite demostrar que es posible el determinar ausencias de bocinas e incluso de unidades en cada uno de los canales, aunque para las bocinas 2 y 3 de ambos canales, el diagnóstico del problema no es tan distinguible mediante los métodos usados por éste proyecto.

	PSD_L	PSD_M	PSD_H	PSD
PSD(No units)	$\sum_{k=1}^6 G \cdot X(k)$	$\sum_{k=7}^{57} G \cdot X(k)$	$\sum_{k=58}^{255} G \cdot X(k)$	$\sum_{k=1}^{255} G \cdot X(k)$
LEFT SURROUND				
IDEAL	673	6224	12208	19105
NO SPK_1	735	5566	10490	16791
NO SPK_2	572	5106	10272	15950
NO SPK_3	875	5487	9423	15785
NO SPK_4	692	5156	12340	18189
RIGHT SURROUND				
IDEAL	568	7332	12490	20390
NO SPK_1	839	6183	12823	19845
NO SPK_2	664	5303	9913	15879
NO SPK_3	851	5256	7669	13776
NO SPK_4	505	4242	12054	16801

Tabla 12: Surround Channels Average PSD Values.

Para el caso del canal de subwoofer, gracias al análisis de la Tabla 13 se puede ver que también la metodología empleada permite diagnosticar de manera perfecta las fallas de ausencia de canal, presión sonora alta, presión sonora baja, y fallas de unidades.

PSD(No units)	$\sum_{k=1}^7 G \cdot X(k)$
IDEAL	12031
SPL 5 dB LOW	6525

Tabla 13: Subwoofer Average PSD Values with ideal conditions, and failures induced.

Por el análisis de cada canal, se observa que los resultados obtenidos en el desarrollo de este proyecto son altamente satisfactorios, pero aún perfectibles.

2.6 CONCLUSIONES

Después de concluidas las etapas de experimentación ideales y de inducción de fallas, y haciendo una comparativa de la hipótesis propuesta en el ?? con los resultados obtenidos del proyecto, se puede concluir que la metodología basada en el análisis mediante procesamiento con Transformada Rápida de Fourier que

se empleo en el desarrollo del mismo, fue bastante adecuada e incluso perfecta para los canales frontales y el subwoofer, sin embargo, se observa que para el caso de los canales de surround, a pesar de diagnosticar sin problemas la mayoría de las fallas, para la ausencia de las bocinas centrales de ambos canales (bocina 2 y bocina 3) los métodos desarrollados no son capaces de diagnosticar sin incertidumbre cual de las bocinas centrales es la ausente. Para robustecer el proyecto, y tener la capacidad de diagnosticar todos los problemas presentados en cualquier canal, deben ser agregadas técnicas complementarias de análisis, como el detectar ángulos de incidencias de las ondas o emitir tonos para la detección de unidades dañadas con mas precisión en los canales de surround.

También se observa que una vez obtenidos los modelos ideales en frecuencia, cualquier anomalía en cualquier canal, genera una desviación del modelo que de no permitir el diagnóstico preciso de la falla, si permite advertir de la zona del problema, y así poder detonar una acción correctiva en tiempo y forma para evitar molestias a los clientes y empresarios, mismas molestias que finalmente se ven reflejadas en perdidas monetarias y descontento de la audiencia que puede generar aún más perdidas cuantiosas en el futuro.

A entendimiento del tesista, el incorporamiento del proyecto desarrollado como sistema de monitoreo en tiempo real en cadenas cinematográficas, ayudaría a generar valor agregado al producto final que reciben los clientes, aumentando por ende la calidad en la exhibición, así como la satisfacción del consumidor final. La inversión inicial de este proyecto, se vería altamente contribuida en el futuro para los exhibidores, al generar beneficios anuales de ahorros en gastos de mantenimiento, viáticos y reembolsos generados por paros de función en las exhibiciones, que como se sabe, son altamente considerables.

Al hacer el análisis hipótesis-resultados, se concluye que los objetivos particulares fueron alcanzados en su totalidad, aunque algunos de ellos no con la contundencia esperada, lo cual hace el proyecto perfectible y con mayor alcance. El desarrollo de una propia red de monitoreo, podría generar un NOC similar al de proyección, que permitiría a distribuidores y exhibidores incrementar su control en las exhibiciones, y brindar una respuesta más rápida y económica que se simplifique en mejora del costo-beneficio tanto para el exhibidor, como para la audiencia.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] UNESCO, "Estadísticas de la unesco," 2011.
- [2] Y. Kapellner-Rabinovitz, "Digital light processing technology (dlp) beyond any conventional projection."
- [3] R. M.-M. Cristina Verde, Sylviane Gentil, *Monitoreo y Diagnóstico Automático de Fallas en sistema dinámicos*. Instituto de Ingeniería UNAM, 2013.
- [4] S. V. Vaseghi, *Advanced Digital Signal and Noise Reduction*. John Wiley and Sons Ltd, 2000.
- [5] R. Chassaing, *Digital Signal Processing and Applications with the C6713 and C6416 DSK*. WILEY-INTERSCIENCE, 2005.
- [6] B. D.-J. L. H. I. S. A. S. D. D. E. P. Douglas Self, Richard Brice and J. Watkinson, *Audio Engineering*. Newnes,Elsevier, 2009.
- [7] DOLBY, *DOLBYCP650*. DOLBY. Installation Manual.
- [8] C. Todd, "Loudness uniformity and dinamyc range control for digital multichannel audio broadcasting," *Conference Publication No. 413 IEEE1995, International Broadcasting Convention, 1995*.
- [9] T. Instruments, *AIC23 codec*. Texas Instruments, March 2004.
- [10] S. Digital, *Manual Tecnico DSK6713*. Spectrum Digital, 2003.
- [11] Audiocontrol, "Cm-10 replacement microphone."
- [12] Dreamworks, "Annual report pursuant to section 13 or 15(d) of the securities exchange act of 1934," tech. rep., Dreamworks, 2004.
- [13] IMAX, "Annual report pursuant to section 13 or 15(d) of the securities exchange act of 1934 for the fiscal year ended december 31, 2014," tech. rep., IMAX, 2014.
- [14] Barco, "Annual report 2014," tech. rep., Barco, 2014.
- [15] H. Salazar, "En México, industria de cine vale oro," Enero 2013.

- [16] M. P. A. of America, "Theatrical market statics," tech. rep., Motion Picture Asociation of America, 2013.
- [17] Z. R. Tamayo, "Alejandro ramírez: el showman de los 1,000 mdd," Enero 2014.
- [18] S. Morgan, "10 things movie theaters won't tell you," Diciembre 2009.
- [19] Forbes, "Los 10 países con más boletos vendidos," July 2013.
- [20] CEA, "Annual report 2013," tech. rep., Cinema Exhibitor's Association, 2013.
- [21] I. de Estadística de la UNESCO, "Mercados emergentes y la digitalización de la industria cinematográfica," tech. rep., UNESCO, 2013.
- [22] J. A. R. Maz, "Museo de cine mexicano," 2000.
- [23] I. L. Sánchez, "Mantenimiento preventivo y correctivo de equipo cinematográfico para la empresa cinepolis." Memoria de Residencias Profesionales para obtener el grado de Ingeniero.
- [24] J. J. D. López, "La técnica del sónido cinematográfico," tech. rep.
- [25] T. Instruments, "History of innovations with ti dlp products."
- [26] E. distribution organization, "Digital cinema figures," tech. rep., Europa distribution organization, 2006.
- [27] X.-S. W. K. Z. K. W. P. Y. W.-D. C. H.-H. S. Zhen-Song Wang, Ling Li, "A digital cinema playback system compliant with the dci specification," 2005.
- [28] K. L.-H. K. S. K. I. S. G. S. U.-S. K. D. i. Taehyum Kim, Dongho Won, "Automated dci compliance test system for digital cinema entities," 2007.
- [29] J. A. Bloom, "Digital cinema content security and the dci," *IEEE*, 2006.
- [30] Doremi. Doremi. Brochure TMS Manual Doremi.
- [31] GDC, "Theater managment system."
- [32] Christie, "Theater managment system."
- [33] Barco. Barco. Cine care services bruchure.
- [34] Christie. Christie. Manual Brochure NOC.

- [35] MIT. MEDIA ILLUMINATION TECHNOLOGIES. Brochure Manual NOC.
- [36] IMAX, "Sound."
- [37] IBM, "Caso de Éxito cinepolis con la solución de ibm tivoli." Youtube, 2011.
- [38] rmunindrapandey, "Big cinemas customer satisfaction survey 2010," Abril 2010.
- [39] A. Vincent, "Secret cinema cancellation: ticketholders complain of lost time and money," julio 2014.
- [40] L. J. G. Cova, "Bolívar, el hombre de las dificultades, podría alcanzar unos 30 mil espectadores en su primera semana," Agosto 2013.
- [41] P. McClintock, "Movie theater on 'interstellar' sound complaints," November 2014.
- [42] Redacción, "Suspenden funciones en cine ducal por un desperfecto técnico," Marzo 2014.
- [43] P. hoy, "Suspenden la proyección de películas en cinépolis por problemas técnicos.," Noviembre 2012.
- [44] BBB, "Teatros."
- [45] A. civil al consumidor, "Testimonios," Enero 2012.
- [46] Publico, "Consumer complains forum."
- [47] PROFECO, "Revista del consumidor no.288," tech. rep., 2001.
- [48] I. Allen, "A short primer on the levels of features, trailers and commercials as heard in the cinema," tech. rep., SVP Dolby Laboratories, TASA, 2009.
- [49] *The TASA standard*, 2015.
- [50] D. B. Sally Hernandez, Devin Walker, "Dangerously loud? monitoring movie theater volume," Febrero 2014.
- [51] P. Zimonjic, "Deafening new films threaten hearing of young cinema goers," Octubre 2004.
- [52] E. A. L. Melanie A Ferguson, Adrian C Davis, "Cinemas - do they pose a risk to hearing?," 2000.

- [53] AUDIOCONTROL, *AUDIOCONTROL RTA SA-3052 SPECIFICATIONS*. AUDIOCONTROL.
- [54] Audiocontrol, *AC-10 MICROPHONE*. Audiocontrol.
- [55] J. F. ALLEN, "The mythical "xçurve," *BOXOFFICE MAGAZINE*, 2001.
- [56] M. Karagosian, "The x curve, is not an equalization curve," 2013.
- [57] JBL-Professional, *5674 JBL Professional Cinema Products Brochure*. Harman Kardon.
- [58] JBL-Professional, *4675 JBL Professional Cinema products Brochure*. Harman Kardon.

COLOPHON

This document was typeset using the typographical look-and-feel `classicthesis` developed by André Miede. The style was inspired by Robert Bringhurst's seminal book on typography "*The Elements of Typographic Style*". `classicthesis` is available for both L^AT_EX and L^YX:

<http://code.google.com/p/classicthesis/>

Happy users of `classicthesis` usually send a real postcard to the author, a collection of postcards received so far is featured here:

<http://postcards.miede.de/>

DECLARATION

Put your declaration here.

Morelia, Michoacán, México, Abril 2016

Iván Luna Sánchez , 15 de
noviembre de 2016