



La Semana del Sonido

Rosario, Argentina, 12 y 19 al 23 de mayo de 2014

Registro y reproducción de discos de Vinilo

Pablo J. Miechi

Centro de Estudio de Música y Tecnología – Fac. de Humanidades y Ares,
Universidad Nacional de Rosario
E-mail: pmiechi@gmail.com

Trabajo presentado el 21 de mayo en la SEMANA DEL SONIDO ROSARIO 2014 y que forma parte del Informe de avance del proyecto de investigación “Restauración del Patrimonio Sonoro Histórico de las Grabaciones del Sello EDUL, propiedad de la UNR” Radicado en el CEPSA (UNLa) por convenio específico con la UNR

Abstract

El proceso de migración de registros sonoros almacenados en discos de poli cloruro de vinilo (comúnmente llamados discos de vinilo) para su preservación y posterior restauración, involucra la interconexión de equipos y tecnologías tanto analógicas como digitales. Desde el propio soporte (el disco propiamente dicho) hasta las técnicas de almacenamiento en formato de archivo digital, todos los pasos requieren de un especial cuidado en cuanto a la integridad de los materiales y calidad del equipamiento como así también de la metodología empleada. Es así, que el conocer en detalle el principio de funcionamiento del soporte y las diferentes características técnicas resulta de vital importancia para abordar profesionalmente la tarea de preservación de una grabación sonora.

En el presente artículo presentaremos una descripción del soporte, cubriendo su principio de funcionamiento, características y proceso de fabricación, el reproductor

(bandeja giratoria), los elementos que lo componen y sus características y variedades, y la etapa de acondicionamiento de la señal (pre-amplificación y ecualización) previa a la digitalización. Por último, se presentarán pautas a seguir para la puesta a punto y operación del sistema de reproducción.

1. Introducción

El proceso de migración al dominio digital de registros sonoros almacenados en discos fonográficos de poli-cloruro de vinilo (la RAE lo define como LP o elepé), en adelante disco de vinilo, abarca distintas etapas, (Fig. 1). En el presente trabajo desarrollaremos sólo las que se encuentran en el dominio analógico. La primera, cubre la elección del ejemplar, si es que se tienen varias copias, y la limpieza del mismo para eliminar polvo e impurezas de la superficie. Luego, nos ocuparemos del proceso de reproducción (transducción mecánico-eléctrico) realizado mediante un reproductor donde la calidad de los componentes mecánicos y eléctricos así como la puesta a punto del sistema son fundamentales para la recuperación fiel de la señal de audio. La última etapa en este dominio consiste en la adaptación de la señal la cual es amplificada y ecualizada acorde a un estándar.

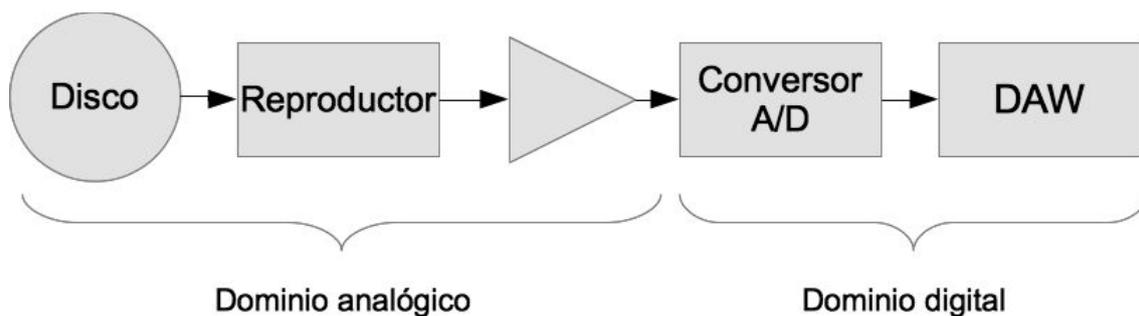


Fig. 1. Cadena de migración.

2. Soporte

En el presente artículo nos centraremos en las características de grabación y reproducción de discos de vinilo de larga duración (LP 33 1/3 rpm), el cual permite almacenar una señal sonora de 20 a 25 minutos por cada cara en un microsurco y tiene un diámetro de 12 pulgadas (30,5 cm) por ser el formato más difundido y aceptado mundialmente para la difusión de música desde su introducción al mercado en 1948 por parte de la empresa Columbia Records.

El primer desarrollo para registrar sonido sobre un soporte físico se debe a Thomas Alba Edison en 1881 con la invención del fonógrafo, un dispositivo capaz de transformar energía acústica en mecánica. El sonido se registraba en un cilindro de cera en el que una aguja tallaba surcos. Para reproducirlos, la aguja recorría los surcos y transmitía las vibraciones a un auricular adosado al dispositivo. El sonido resultante era de muy pobre calidad y además el mecanismo dañaba el soporte de forma que sólo se podía reproducir una vez.

En 1887, Emile Berliner patentó un invento al que llamó “Gramófono” el cual sería el primer desarrollo sustentable para la distribución de música sobre soporte, reemplazando el cilindro por un disco plano en el que se tallaba un surco en espiral. Su importancia histórica radica en el hecho que la grabación podía reproducirse reiteradas veces y se podían realizar copias del original a un relativo bajo costo.

A partir de esa fecha se sucedieron una serie de avances en la tecnología del disco tanto en el reemplazo del material para su construcción como también en la velocidad angular que se utilizaba para su reproducción. Pero no sería hasta 1920 que se adoptaría el estándar de 78 rpm y se comercializaban en dos tamaños: 10 pulgadas (25 cm) (el más popular) y 12 pulgadas (30 cm) principalmente para grabaciones de obras de música clásica.

Hubo un primer intento de grabar y reproducir discos a 33 1/3 rpm por parte de la empresa RCA en 1930 pero el desarrollo fracasó y la compañía abandonaría el proyecto.

Fue en 1948 que la Columbia empezó a comercializar discos de 33 1/3 rpm en el formato conocido como “Larga Duración” (LP) en discos de 12 pulgadas. Este sería finalmente el formato más popular. Un año después la RCA lanza al mercado el disco de 45 rpm y 7 pulgadas de diámetro (17,5 cm) con una canción por lado y por esto se llamaría “Simple” o “Sencillo”. Los discos fabricados en Estados Unidos tenían una perforación central de 1,5 pulgadas (38 mm) mientras que los que se comercializaban en otros países poseían el mismo tipo de perforación central del LP: 1/4 de pulgada (6mm).

Ambos formatos estuvieron vigentes por muchos años en lo que se conoció como “La guerra de la Velocidad”, la cual sería ganada finalmente por el LP¹.

Históricamente los formatos más comunes son:

- 12 " (30 cm) / 33 ⅓ rpm LP
- 7 " (17,5 cm) / 45 rpm EP o individual

seguido por

- 10 "(25 cm) / 45 rpm LP (sustituido por 12 " (30 cm) / 33 ⅓ rpm LP en los años 60)
- 12 " (30 cm) / 33 o 45 rpm Maxi Single (introducido en la década de los 80)

La calidad del sonido y la durabilidad de los discos de vinilo es altamente dependiente de la calidad de la materia prima utilizada. Para bajar costos de producción, la mayoría de los discos de vinilo se prensan desde material reciclado. Actualmente se re-editan álbumes históricos en discos de 180 g/m² de vinilo. Estos álbumes tienden a resistir la deformación causada por la reproducción normal mejor que el vinilo regular.

3. Proceso de grabación y producción

La producción de discos pasó por distintos procesos evolutivos desde su invención hasta llegar a la metodología hoy utilizada. El primer paso en el proceso de producción es el corte del disco². Este consta de la modulación del surco en un disco patrón acorde a las dimensiones del mismo y el procesamiento de señal según un estándar. Consiste de un disco de aluminio en blanco revestido con una capa uniforme de laca de nitro celulosa en ambas caras. Los discos patrón son producidos en diferentes tamaños, generalmente más grandes que el tamaño normal para tener espacio que permita la calibración de la púa cortadora, temperatura de la misma y profundidad del surco. Este procedimiento se realiza en tornos que constan de una bandeja giratoria de precisión que gira a velocidad constante y al mismo tiempo presenta un mecanismo de desplazamiento radial de la púa en forma de espiral que transfiere la señal almacenada en el soporte de producción al disco patrón, pasando por un proceso de ecualización. Generalmente, el corte del disco se realiza a la misma velocidad de reproducción (33^{1/3} o 45 rpm), aunque hay técnicas de corte a mitad de la velocidad para extender el rango de frecuencias. Estos

¹ Los datos consignados fueron extraídos de: Record Collector Guild (s.f.). *About Vinyl Record*. Recuperado el 10 de marzo de 2014 de www.recordcollectorsguild.org/modules.php?op=modload&name=Sections&file=index&req=viewarticle&artid=44&page=1

² En inglés “disk mastering”.

tornos, además, se encargan del corte de los surcos de inicio y fin del lado. Para cortar el lado B del disco se utiliza otro en blanco. Un disco patrón puede generar miles de discos de primer grado.

La púa de corte, el más importante de los elementos del sistema de grabación, es un instrumento puntudo y filoso generalmente producido en algún tipo de metal o piedra semi-preciosa. La misma, presenta una forma específica que permite cortar el surco y a la vez eliminar la rebaba que va dejando.

Luego del proceso de corte, el disco es lavado con agua y jabón y recubierto con cloruro de estaño, permitiendo la adherencia de una delgada capa de plata que se le aplica posteriormente. El disco ya plateado es sumergido en una solución basada en níquel a la cual se aplica una carga eléctrica para que este lo recubra. El disco es retirado y lavado nuevamente. Este proceso se denomina baño galvánico o galvanoplastia. La capa de plata y níquel es retirada del disco patrón, obteniéndose una copia negativa del mismo, llamada disco matriz. Si se está produciendo un disco de doble cara, se tendrán dos discos matriz.

El disco matriz es tratado con níquel para obtener una copia positiva metálica, llamada disco madre la cual podría ser reproducida de la misma forma que cualquier disco. A esta altura del proceso, si aparecen ruidos se utiliza una púa especial que pule el surco. De esta copia madre, también por medio de un niquelado, se hacen las copias negativas llamadas estampadores. A partir del disco estampador se saca la copia positiva final o copia comercial, mediante el prensado de una pastilla caliente de poli-cloruro de vinilo entre los dos moldes estampadores o matrices correspondientes a las dos caras del disco.

Existe una técnica denominada DMM³ por la cual la música es transferida directamente a un disco metálico relativamente blando, por lo general de cobre. El corte se hace en frío. De este modo, solo es necesario un proceso galvánico para obtener los estampadores. El objetivo de este método es el de abaratar costos de producción para ediciones de discos de poca cantidad, pero debido que se requiere del pago de licencias, esta técnica no se propagó como debería.

³ En inglés "Direct Metal Mastering"

Para tener un conocimiento más detallado del proceso se sugiere consultar los escritos de Alexandrovich, G. (1987) y Harley, R. (2007).

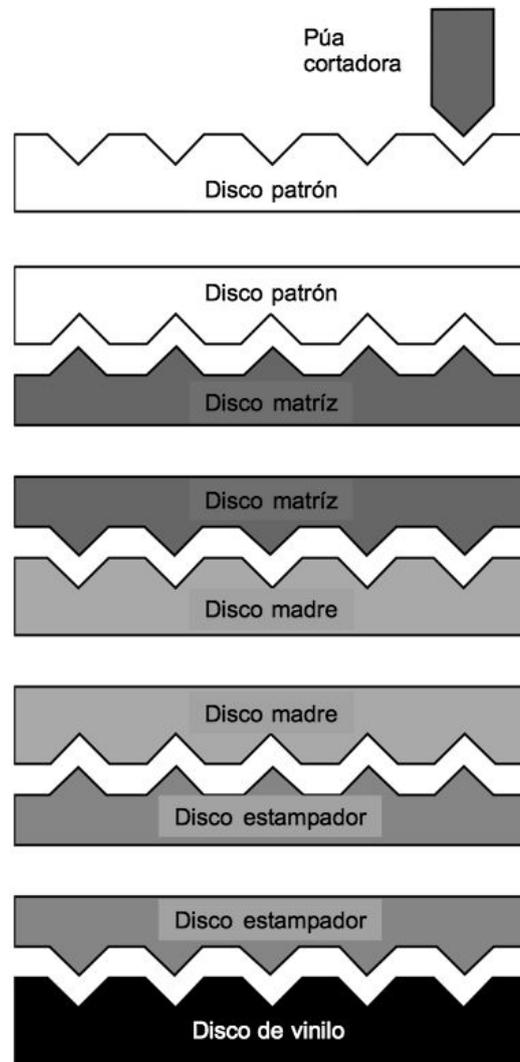


Fig. 2. Proceso de grabación y producción del disco de vinilo.

4. Reproductor

El reproductor es el segundo dispositivo que se encuentra en nuestra cadena y es el encargado de realizar la traducción mecánico-eléctrica de la señal. En la Fig. 3 se indican sus partes principales.

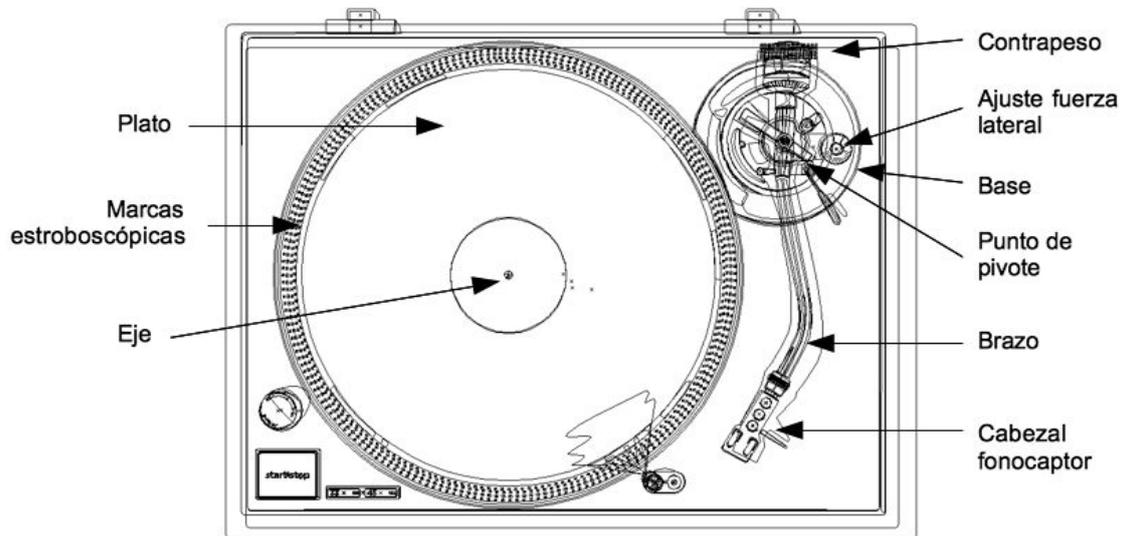


Fig. 3. Partes del reproductor fonográfico

4.1. Bandeja giratoria

El plato y motor componen la bandeja giratoria y cumple la función de hacer rotar al disco a la velocidad constante requerida. Los motores utilizados son eléctricos sincrónicos o motores con algún tipo de control de velocidad presentando, en las bandejas actuales, una desviación de la velocidad del 1%.

A lo largo de los años se desarrollaron diferentes sistemas que permitan al motor impulsar al plato, entre los más desarrollados nos encontramos con: el vinculado por correa⁴, vinculado por disco⁵ y el directo.⁶

El vinculado por correa (Fig. 4.a) consta de un sistema donde el motor hace rotar al plato por un sistema de poleas y una correa de goma. La velocidad de este sistema puede cambiarse, variando la velocidad del motor o bien cambiando la relación entre los diámetros de las poleas. Este sistema tiene la característica de ser el más silencioso. El segundo tipo de sistema (Fig. 4.b) consta de un disco con su borde exterior está recubierto por neopreno que acopla el motor al plato transmitiendo la rotación por rozamiento y evitando transmitir vibraciones. Cuando se detiene el motor, este disco tiene un mecanismo de retracción para evitar el desgaste innecesario del neopreno. Este sistema tiene la ventaja de que el plato alcanza la velocidad deseada casi instantáneamente, lo cuál es beneficioso en algunas aplicaciones.

⁴ En inglés "belt driven"

⁵ En inglés "puck driven"

⁶ En inglés "direct driven"

El tercer tipo de sistema es aquel donde el motor está acoplado directamente con el plato, es decir, el eje del motor coincide con el eje del plato, pero también existen otras variaciones en el diseño. Este tipo de acople se ve fuertemente afectado por la performance del motor, ya que pequeñas variaciones de velocidad se reflejan directamente en el plato. Generalmente, este tipo de sistemas utilizan bandejas pesadas que suavizan este efecto debido a su propia inercia.

Las prestaciones de la bandeja muy poco dependen del tipo de sistema de acople, pero la bandeja giratoria ideal debería presentar las siguientes propiedades:

- comienzo rápido
- rotación a la velocidad exacta sin variaciones
- no debe haber ruidos y vibraciones provenientes del motor. Tampoco estos deben ser transmitidos al plato.
- debe estar aislada de vibraciones que puedan venir del mobiliario o edificación.
- el plato debe tener su manta para evitar resonancias en el disco durante la reproducción.

No todas las bandejas cumplen con los criterios anteriormente citados, pero se pueden realizar pruebas para evaluarlas. Para nuestro objetivo, el más importante de ellos es obtener la velocidad de rotación adecuada.

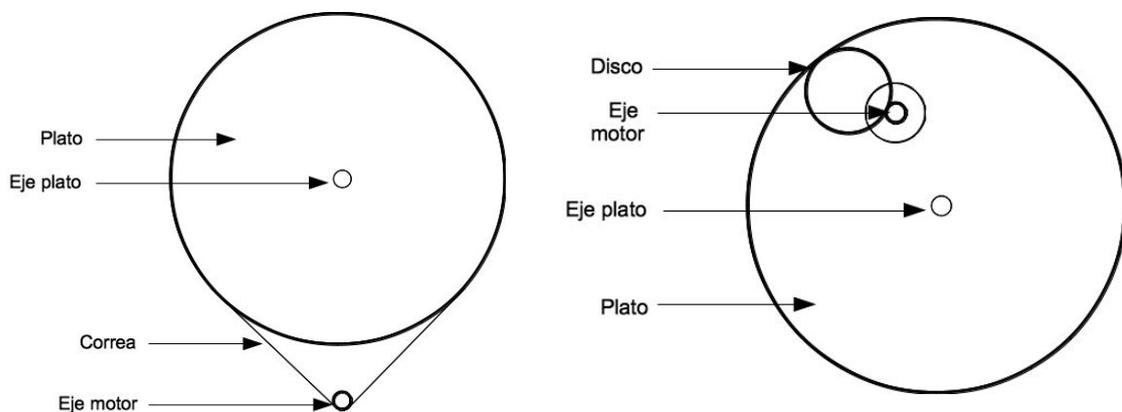


Fig. 4.a. Transmisión por correa. **b.** Transmisión por disco

4.1.1. Prueba de velocidad de rotación.

El método más simple y habitual es utilizando un disco estroboscópico (Fig. 5.a) ,o bien, utilizando las marcas de los platos que la mayoría de las bandejas poseen en su

costado (Fig. 5.b). Para llevar a cabo esta prueba se iluminan tanto el disco o las marcas del plato con una fuente de luz alimentada por la red eléctrica de corriente alterna. Cuando la velocidad de rotación es correcta, las barras parecen quedarse quietas, en cambio si estas barras se mueven en sentido de la rotación del plato, significa que la velocidad es mayor a la deseada y viceversa. Estas barras estroboscópicas deben estar marcadas siguiendo la siguiente ecuación.

$$\text{cant. barras} = (2 \cdot f \cdot 60) / \text{rpm}$$

donde, f es la frecuencia de la red eléctrica (50 Hz/60 Hz) y rpm son las revoluciones por minuto del plato.

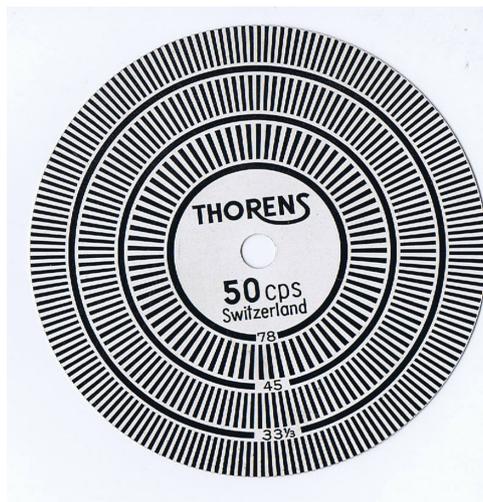


Fig. 5.a. Disco estroboscópico.



Fig. 5.b. Plato estroboscópico.

4.2. Brazo

Este componente es otra de las partes fundamentales del reproductor y puede ser clasificado en dos categorías: pivotante y tangencial.

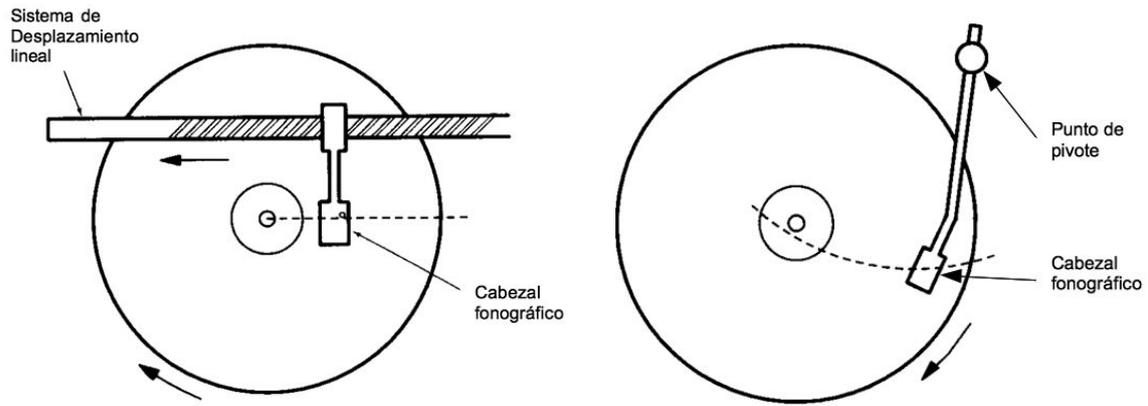


Fig. 6.a. Brazo tangencial. **b.** Brazo pivotante.

El brazo, además de proveer un soporte para el cabezal fonocaptor, sea pivotante o tangencial, tiene por objetivo el permitir que el surco del disco pueda ser re-trazado de la misma forma en cual fue grabado. Cada tipo tiene sus respectivos pro y contras al realizar esta tarea. En nuestro trabajo abordaremos el estudio del brazo pivotante ya que es el tipo de dispositivo más utilizado.

4.2.1. Geometría del brazo

La geometría del brazo se diseña dependiendo del diámetro del disco y de la distancia del centro del plato al punto de pivote. Pero además, el diseño debe permitir que la lectura del surco sea tangencial durante toda la reproducción del disco, tanto en el surco de mayor diámetro (exterior), como en de menor diámetro. Este requerimiento es sumamente importante ya que, como comentamos anteriormente, en el momento del corte de la copia maestra del disco este se lleva a cabo realizando un barrido perpendicular al radio, por ende, tangente al surco (Fig. 7.a). Es por ello que la mayoría de los brazos presentan un desplazamiento, adoptando forma de "J" o "S", de manera de minimizar este error (Fig. 7.b).

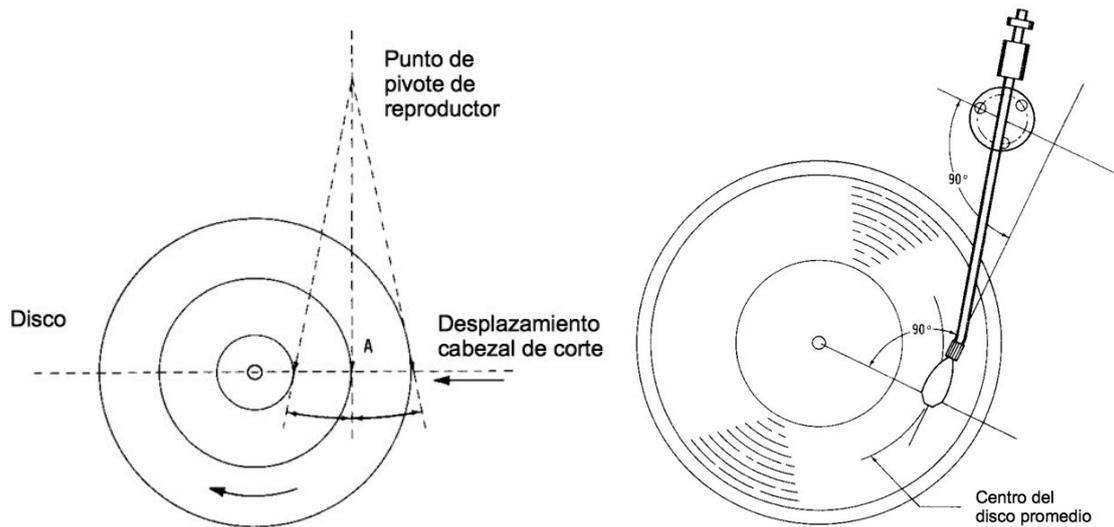


Fig. 7.a. Desplazamiento de púa cortadora vs púa reproductora. **b.** Cabezal fonocaptor tangente al surco.

En el desplazamiento radial del brazo pivotante durante su recorrido, este no podrá permanecer tangencial para todos los surcos apareciendo un desvío angular el cual se denomina “error de seguimiento lateral” (ESL). Este desvío genera una distorsión armónica por “error de seguimiento lateral” (DESL). Esta distorsión no sólo depende del ángulo de desvío, sino también se ve incrementada con la disminución de la velocidad tangencial a medida que se acerca al centro del disco.

Percy Wilson (1924), planteó ecuaciones para la alineación del conjunto brazo-cabezal fonocaptor para minimizar el ESL. Básicamente, proponía que la longitud efectiva del brazo (distancia desde el punto de pivote hasta la púa) debía ser mayor que distancia entre el punto de pivote y el eje de rotación del disco. A la diferencia se la denomina “distancia de sobrepaso”⁷ Este fue un avance importante pero con la presunción errónea de que la DESL disminuía también.

⁷ En inglés denominado “overhang”

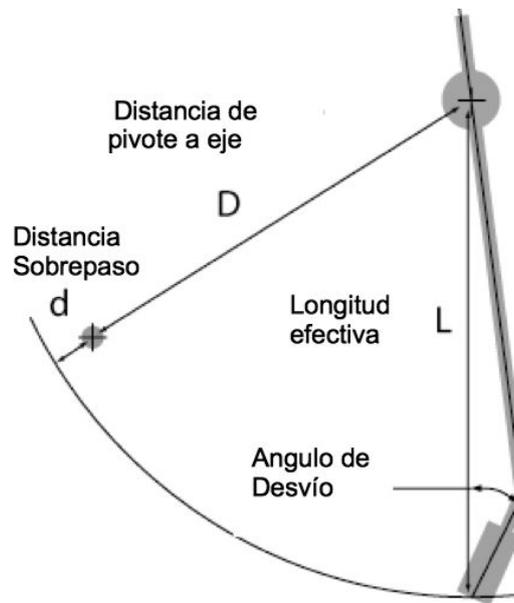


Fig. 8.a. Distancias.

Años más tarde, Erik Löfgren (1938), propuso nuevas ecuaciones que corregían la presunción de Wilson. Löfgren recomendaba fijar dos puntos a lo largo del radio del disco donde el ángulo de desplazamiento respecto a la tangente sea nulo. Los puntos de nulidad estarán ubicados un en un radio exterior y otro interior. Siguiendo esta recomendación, la DESL tendrá tres puntos máximos y dos puntos nulos (fig. 7). Tanto Löfgren como Baerwald (1941) demostraron que la mayor alinealidad se daba en el 2º armónico, existiendo también en armónicos superiores pero a niveles menores. Además, también se produce distorsión por modulación, la cual es más audible que la distorsión armónica.

Más adelante en este trabajo veremos la metodología para la alineación de la geometría del conjunto brazo-sonocaptor.

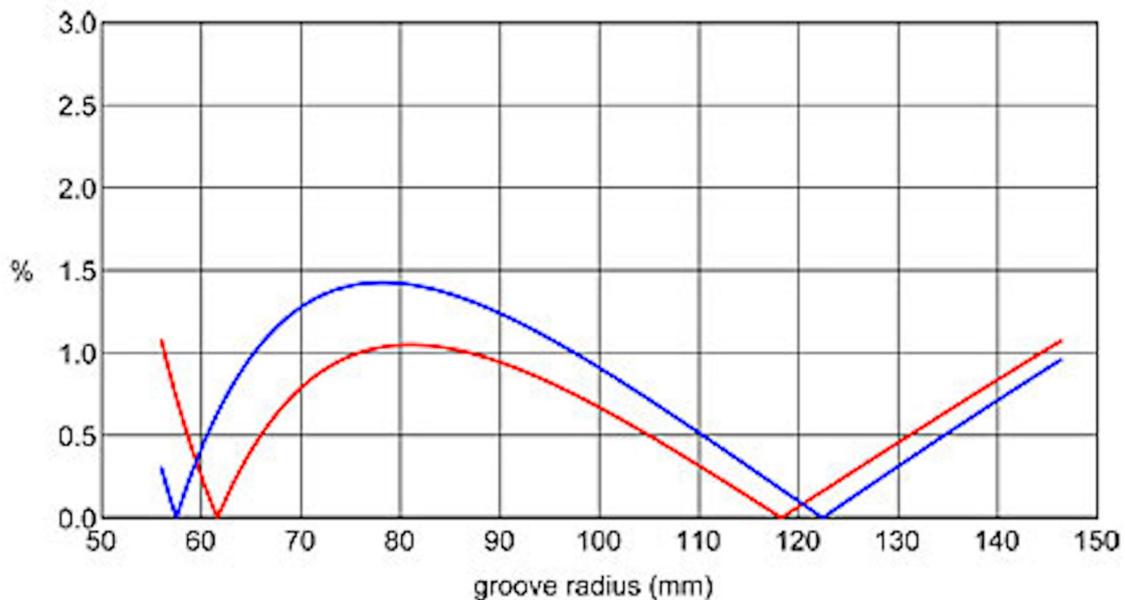


Fig. 8.b. Porcentaje de distorsión en función del radio. Löfgren (en rojo). Baerwald (en azul).

4.3. Fuerza de patinaje (skating force)

Con el objetivo de obtener un seguimiento exacto del surco aparece una fuerza sobre la púa denominada de patinaje. Esta se produce debido a la propia geometría del brazo y al rozamiento de la púa con el surco, y se manifiesta haciendo que la púa se aleje del punto de pivote. En la fig. 8.a se pueden ver los vectores fuerza actuantes y la resultante. Si esta fuerza es importante, durante la reproducción del disco puede suceder que la púa salte de un surco a otro, de a uno o varios por vez, y si no es importante, se aplicará una presión mayor sobre el lateral de menor radio del surco haciendo que la señal grabada en este tenga mayor amplitud o distorsión.

Se podría decir que la fuerza de patinaje se mantiene constante para los distintos radios del surco y su variación puede darse con la fuerza de rozamiento debido a la relación púa-material del disco.

Para contrarrestar esta fuerza se debe aplicar otra de igual magnitud pero en sentido contrario, llamada fuerza lateral (anti-skating force), la cual debe ser constante a medida que el brazo pivota. Esta fuerza se implementa por medio de resortes, imanes, pesos y poleas, aplicados al brazo e implementados en la base de pivote.

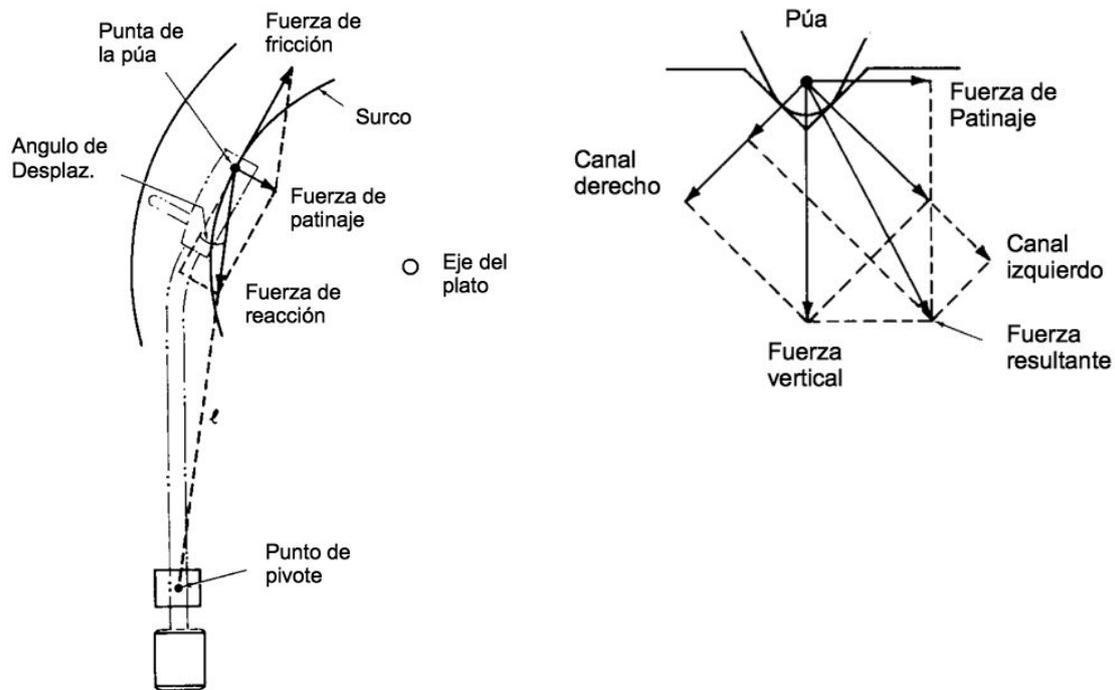


Fig. 9.a. Fuerza involucradas en la resultante de la fuerza de patinaje. Vista superior. **b.** Vista trasera.

4.4. Cabezal fonocaptor

Otro componente importante que encontramos es el cabezal fonocaptor, el cual está diseñado para seguir las excursiones del surco, en conjunto con la púa, y convertir dicho movimiento en señales eléctricas (transductor mecánico-eléctrico). Estos se clasifican de acuerdo al principio utilizado para convertir el movimiento mecánico en una señal eléctrica: electrodinámico y piezoeléctrico.

Los cabezales electrodinámicos están subdivididos en tres categorías: imán móvil, bobina móvil e imán inducido. Todos se basan en el mismo principio de funcionamiento que consiste en interceptar una bobina en movimiento en un campo magnético para generar la circulación de corriente eléctrica. La diferencia entre ellos radica en la forma de construcción del cabezal: si el imán está adosado a la púa y la bobina es fija, se denomina de imán móvil, si el imán está fijo y la que es móvil es la bobina se lo denomina de bobina móvil, y por último, si la bobina y el imán están fijos y se induce una pieza metálica magnetizada por el imán se denomina de imán inducido.

A diferencia de los cabezales electrodinámicos, los piezoeléctricos basan su principio de funcionamiento en la generación de una señal al aplicársele una fuerza a un cristal,

generalmente sal de Rochelle. Estos fueron los más producidos hasta 1970 debido a su bajo costo, robustez y amplitud de voltaje generado, pero se utilizaban en equipos de inferior calidad debido a que su transducción no es lineal.

4.4.1. Características eléctricas

Los piezoeléctricos son los que producen el mayor voltaje de salida. A estos le siguen los de imán móvil (2 mV), luego los de imán inducido (0,3 mV) y por último los de bobina móvil (0,4 mV). Pero si evaluamos la potencia generada, los últimos son los que mayor potencia entregan, por lo que con un transformador elevador, se puede obtener el voltaje deseado.

La impedancia de carga requerida también es distinta para cada tipo de cabezal. Los piezoeléctricos son los más susceptibles a cargas capacitivas en todo el rango de frecuencias, en los de imán móvil sólo afecta a la región de alta frecuencia, mientras que los de bobina móvil son casi inmunes. Sin embargo, al estar conectados a un transformador elevador, el secundario del mismo se vuelve muy sensible a la carga. Los fabricantes de cabezales fonocaptadores especifican las cargas resistivas y capacitivas permitidas. Para los de imán móvil se recomienda una carga de 47 k Ω en paralelo con un capacitor de 200 a 400 pF, mientras que para los de bobina móvil del orden de 50-75 Ω .

Los más difundidos son los de imán móvil, por sus prestaciones eléctricas y costo. Los de bobina móvil brindan una mejor calidad sonora, pero por un lado son más costosos, y por otro, requieren de un preamplificador específico que también se traduce en un mayor costo.

4.5. Surco y púa de reproducción

La púa de reproducción es el primer vínculo entre la información almacenada en el surco y el sistema de reproducción. La calidad del sonido está influenciada por la precisión con la que la púa sigue la modulación de la grabación. Para poder entender qué se le requiere a una púa analizaremos cómo es el surco en un disco monofónico y en uno estereofónico y cómo es modulado en ambos casos.

Un surco monofónico puede almacenar dos tipos de modulación. Los primeros sistemas de cilindro (Fonógrafo) utilizaban modulación vertical donde la profundidad del surco

es variable (valles y picos). Con la aparición de los discos (Gramófono), la modulación lateral se hizo popular. A diferencia de la anterior, este tipo de modulación presenta profundidad constante y la púa deflexiona hacia los laterales del surco.

En las primeras grabaciones estereofónicas los canales eran separados uno del otro mediante la modulación de 90° entre ellos, con un canal grabado con modulación vertical y el otro con lateral. En seguida notaron que la modulación vertical presentaba mayor distorsión que la lateral y por ende diferencias importantes en la señal estereofónica al asignar cada modulación a un canal del estéreo, generando una imagen resultante desequilibrada.

Así surgió una nueva propuesta (Keller. 1938) llamada “ $45^\circ/45^\circ$ ” donde el surco es cortado de tal forma que las dos paredes del mismo forman una “V” estando a 45° respecto a la superficie y a 90° entre sí. Con este método la modulación se aplica a cada cara del surco a 45° . La resultante del movimiento en simultáneo de ambas caras genera una modulación vertical, si bien la profundidad del surco es constante. Con este método los problemas resultantes de esta modulación se distribuyen en ambos canales. Además, para minimizar los problemas de excursión vertical en baja frecuencia las señales deben estar en fase de tal manera que se produzca sólo modulación lateral en este rango del espectro. Se definió que la información del canal izquierdo sería almacenada en la cara interior (más cercana al centro) y la derecha en la cara exterior del surco.

La forma de la púa de reproducción difiere de la de la púa de corte o grabación y además debe duplicar su movimiento sin alterar o dañar el surco. Por lo tanto presenta bordes redondeados y pulidos para un seguimiento de surco suave. La púa se apoya en dos puntos en el surco y generalmente es redondeada para minimizar no linealidades del cabezal y brazo.

Existen varios tipos de púas hoy en día, la más simple y antigua es la de punta esférica, construida con un cilindro de diamante o zafiro pulido con forma de cono con punta esférica precisa. Debido a que el espesor del surco no puede ser menor a $25,4 \mu\text{m}$ y la punta de la púa debe ser igual o menor que este. Las púas de hoy tienen un diámetro del orden de $12,2 \mu\text{m}$ a $17,7 \mu\text{m}$.

Otro tipo de púa es la de punta elíptica, la cuál vista de frente se ve como la esférica, sin embargo tiene dos superficies planas pulidas en el frente y en la parte trasera. Esto permite que el radio de la punta sea menor, del orden de $5 \mu\text{m}$, permitiendo el seguimiento de modulaciones de alta frecuencia.

Debido a que la púa de grabación corta un surco más angosto cuando esta se mueve hacia los costados, esto produce un efecto en la reproducción que hace que la púa se levante generando una distorsión de 2do armónico en la modulación vertical. Este efecto es más notorio en las púas esféricas ya que esta no puede ingresar en dicha modulación.

Existe un tercer tipo de púas que buscan obtener mayor contacto con las paredes del surco manteniendo el radio de la punta elíptica. Entre ellas: Shibata, hyper-elíptica, contacto lineal.

El material de las puntas de las púas actuales es de diamante, generalmente adosada a otro material que actúa como soporte y vinculación con el cabezal. A lo largo de los años se experimentó con distintos tipos de materiales adoptando finalmente el aluminio dado que es resistente, liviano, no es magnético y presenta resistencia a la corrosión. Este soporte tiene un diámetro aproximado de $0,76 \text{ mm}$ y un largo que puede ir de $1/4$ a $1/2$ pulg.

La cantidad de fuerza necesaria para mover la púa de reproducción depende de varios factores, el más importante es la compliancia⁸ de la púa. La compliancia es la capacidad del conjunto de la púa (punta, soporte y bobina/imán) a reaccionar a la modulación del surco. Esta se mide en $\mu\text{m}/\text{Nm}$ y brinda la cantidad de deflexión de la punta de la púa ante una fuerza dada. La compliancia puede ser medida de forma dinámica o estática. La estática puede ser medida observando la deflexión de la púa ante la presencia de una carga conocida y es sólo un indicador de la sensibilidad que presenta a la fuerza de seguimiento vertical. Generalmente, la compliancia estática es mayor que la dinámica. Por otro lado, la compliancia dinámica nos provee información de la habilidad de seguimiento del surco en baja frecuencia, y además, nos permite calcular la frecuencia

⁸ Grado de rigidez o elasticidad de un sistema mecánico

de resonancia del conjunto brazo-fonocaptor.

4.5.1. Fuerza de seguimiento vertical

La fuerza de seguimiento vertical⁹ medida en g, es un parámetro importante en el seguimiento del surco y alineación de los elementos internos del cabezal. Este factor influye sobre la masa que se ejerce sobre la púa afectando su respuesta a las modulaciones. Es habitual, que en la operación de un reproductor, el fabricante provea un rango de valores recomendados, generalmente del orden de los 2 g.

4.5.2. Angulo de seguimiento vertical

Habitualmente, se producen niveles altos de distorsión en la reproducción por errores en la configuración del ángulo de seguimiento vertical (ASV)¹⁰. Este es el ángulo existente entre el soporte de la púa y la superficie del disco, como se muestra en la Fig. 10, sin embargo, para ser más precisos, es el ángulo de la línea creada entre la punta de la púa y el punto de pivoteo del soporte de esta, respecto a la superficie del disco. A veces, este ángulo también puede ser indicado en otra posición transpuesto 90° en sentido anti-horario. Esto muestra que el plano de movimiento de la púa está rotado respecto a la perpendicular. Además debemos notar que el ángulo entre el eje longitudinal de la punta de la púa y la superficie del disco no es igual que el ASV, este se denomina ángulo de rastillaje de la púa ARP¹¹. No está demás aclarar que si el ASV varía, el ARP también lo hace.

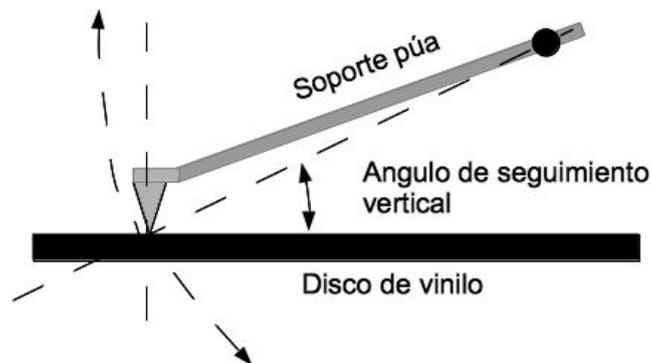


Fig. 10. Ángulo de seguimiento vertical.

El origen de este ángulo radica en el mecanismo de corte del disco, donde se puede ver

⁹ En inglés "vertical tracking force"

¹⁰ en inglés "vertical tracking angle"

¹¹ en inglés "stylus rake angle"

en la Fig. 11.a, la púa de corte presenta un punto de pivote y por lo tanto un ángulo de corte vertical. En modulaciones laterales (monofónicas), esto no presenta consecuencias, pero en discos con pistas estereofónicas si las presenta. En la Fig.11.b se muestra una onda senoidal pura grabada con una púa de corte habitual y como esta queda modulada en el surco. Se puede apreciar que la última presenta cierta distorsión.

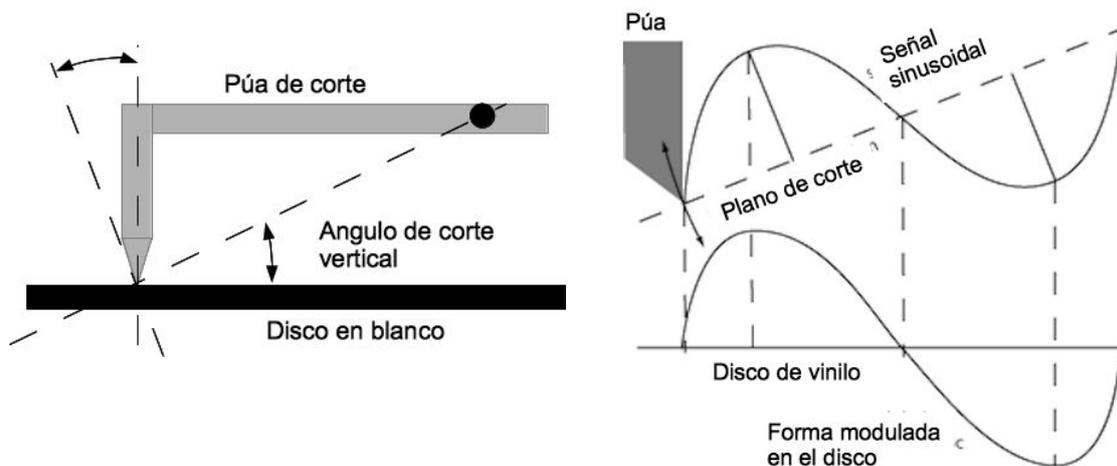


Fig. 11.a. Púa de corte. **b.** Forma de modulación vertical en el surco.

Es por ello, que para poder recuperar la señal original, es necesario que la púa de reproducción, se mueva en el mismo plano que la púa de corte. Si bien, la púa de corte no se mueve en un plano, dado que el movimiento tiene forma de arco, la variación en toda la excursión es del orden de 1°.

Para asegurarse de que se utilice el mismo ángulo de corte y pueda evitarse este tipo de distorsión, se adoptó un ángulo de 15° en U.S.A. y de 20° en Europa con una tolerancia de $\pm 5^\circ$.

Podemos agregar que este ángulo puede variar en la reproducción en discos que presentan deformaciones generando resonancias de baja frecuencia (3 Hz).

4.5.3. Azimuth

El azimuth se refiere a la rotación respecto de la vertical del cabezal y por ende de la púa. El objetivo es que la púa siga al surco en posición vertical. El ajuste de este parámetro afecta al balance de la imagen estéreo y la diafonía o solapamiento entre canales. Que el cabezal se encuentre alineado, no significa que la púa también los esté.

4.6. Conjunto brazo-cabezal fonocaptor

La geometría de los brazos es variada con la necesidad de alcanzar un mismo objetivo: disminuir la distorsión de seguimiento del surco. Para obtener los mejores resultados y minimizar dicha distorsión existen distintas metodologías de calibración. Los fabricantes más conocidos proponen metodologías propietarias para sus productos, mientras que a su vez existen propuestas de calibración universales, las principales y más utilizadas son las de Baerwald, Löfgren y Stevenson (Vinylengine, 2005)

El camino que sigue la púa durante la reproducción es un arco (fig. 7.a), como consecuencia de esto, la púa no siempre está tangencial al surco, sólo lo será en dos puntos denominados “puntos nulos”. Las metodologías anteriores, proponen definir la ubicación de dichos puntos según el criterio aplicado por cada autor. Por ejemplo, los puntos nulos, medidos desde el centro del disco son:

- Baerwald: 66.0 y 120.9 mm
- Löfgren: 70.3 y 116.6 mm
- Stevenson: 60.325 y 117.42 mm

Al establecer los puntos nulos utilizando cualquiera de las metodologías, estamos definiendo la longitud efectiva correcta, la distancia de sobrepaso correcta y el ángulo de desplazamiento correcto.

La elección de la metodología tiene su parte objetiva y su parte subjetiva, debido al objetivo planteado en nuestro trabajo seleccionaremos la metodología que nos brinde el menor porcentaje de distorsión a lo largo de toda la reproducción del disco.

La alineación del conjunto brazo-fonocaptor se realiza utilizando un transportador, el cual fue confeccionado siguiendo alguno de los criterios enumerados anteriormente. Existen transportadores con un punto de alineación y con dos puntos de alineación. Generalmente estos últimos son los recomendados y que más precisión permiten alcanzar.

5. Ecuilización de pre-énfasis y de-énfasis

Existe un requerimiento de ecualización del disco tanto en el corte como en la

reproducción debido a que ambos cabezales normalmente son transductores de velocidad.

En el proceso de corte, se requiere que el mismo se realice a amplitud constante, de manera que para un dado nivel, una frecuencia de 100 Hz no ocupa mas espacio lateral que una señal de 10 kHz, esto evitaría que un surco ocupe mucha superficie. Para cortar un disco a amplitud constante, no basta con enviar una señal con respuesta en frecuencia plana al cabezal de corte, dado que este es un dispositivo electromagnético y por ende un transductor de velocidad. En la Fig. 12 se ilustran las consecuencias, mostrando dos ondas senoidales en fase, donde una es el doble de la frecuencia de la otra.

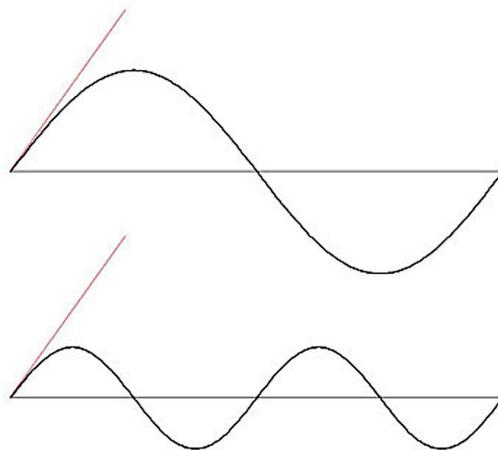


Fig. 12. Dos senoidales, una del doble de frecuencia que la otra, con velocidad de pico (en rojo).

Se puede ver que si se alimenta el cabezal de corte con señales de amplitud constante, se cortarían señales a velocidad constante donde la frecuencia más baja tendrá el doble de amplitud que la frecuencia más alta. Para compensar este efecto se debe aplicar una ecualización electrónica, denominada pre-énfasis, a la señal enviada al cabezal de corte. Idealmente, este pre-énfasis debe duplicar el voltaje de la señal cada vez que se duplica la frecuencia, lo equivalente a un crecimiento de 6 dB/oct a lo largo del rango de frecuencias audibles. En la Fig. 13 se muestra este requerimiento (rojo) y la curva propuesta por R.I.A.A. (Recording Industry Association of America, 1964)(en azul).

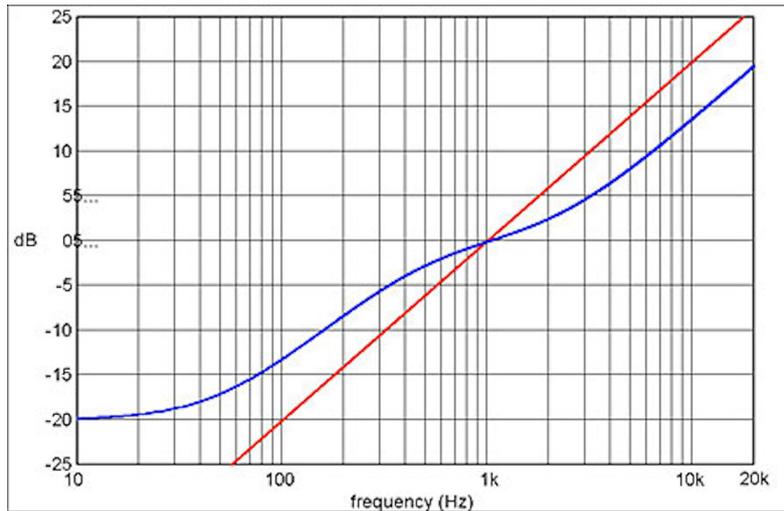


Fig. 13. Curva R.I.A.A. de pre-énfasis (en azul), con la ecualización requerida de 6 dB/oct requerida (en rojo).

Podemos ver que la curva R.I.A.A. es una aproximación del requerimiento de corrección para grabación a amplitud constante, proveyendo 40 dB de amplificación, en lugar de los 60 dB necesarios (equivalente a ganancia 1000 para cubrir el rango de 20 Hz a 20 kHz).

Debido a que los cabezales fonocaptadores son en su mayoría transductores electromagnéticos, el voltaje generado por estos también será proporcional a las velocidades de modulación. Por lo tanto, para recuperar la respuesta en frecuencia original es necesario aplicar una ecualización inversa denominada de-énfasis (Fig. 14). La curva de ecualización R.I.A.A. está definida por tres constantes de tiempo (T), las cuales definen tres frecuencias en la respuesta por la ecuación:

$$f = \frac{1}{2\pi T}$$

Las constantes de tiempo definidas y sus respectivas frecuencias son:

- 3180 μs (50,05 Hz)
- 318 μs (500,5 Hz)
- 75 μs (2,122 Hz)

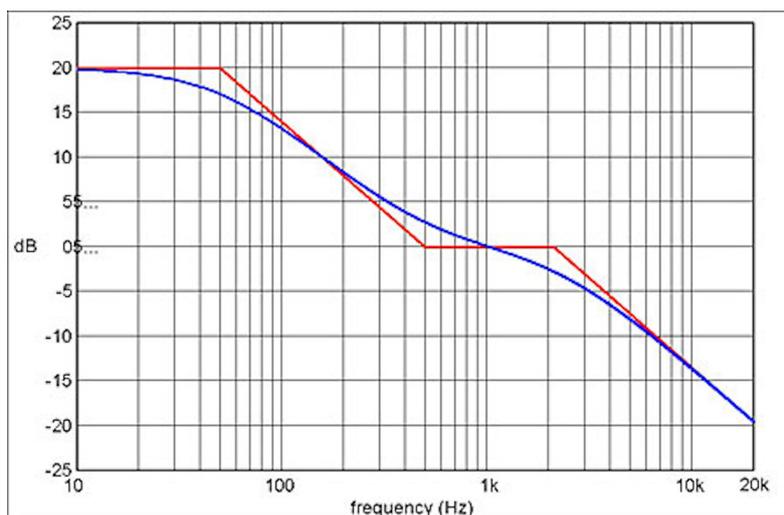


Fig. 14. Curva de ecualización R.I.A.A. para reproducción (azul). La curva roja muestra una aproximación en línea recta basada en las constantes del filtro.

Aunque la R.I.A.A. es una asociación Estadounidense, las ecualizaciones de grabación y reproducción fueron adoptadas internacionalmente muy rápido.¹²

A lo largo de los años se propusieron modificaciones buscando filtrar frecuencias fuera del rango audible que fueran problemáticas. De todas estas propuestas finalmente se agregó una nueva constante de tiempo a la curva de de-énfasis de $2,18 \mu s$ equivalente a una frecuencia de 50,5 kHz ya que, fuera del estándar, las empresas cortadoras de discos la aplicaban para evitar daños en el cabezal de corte.

Howard, K. (2009) brinda información más detallada sobre este tema.

6. Preamplificadores fonográficos

Hemos visto que las señales generadas por los cabezales fonocaptors son del orden de los mV, las cuales deben ser elevadas a niveles superiores sin producir cambios en el espectro de frecuencias y en la fase, con una alta relación señal-ruido y agregando muy baja distorsión.

Si consideramos que un cabezal fonocaptor genera 1 mV por cada cm/seg de velocidad grabada y la velocidad de grabación promedio es de 5 cm/seg, la salida de este será del

¹² La primera publicación fue parte de la norma IEC 98 (1964), hoy se encuentra vigente en su versión revisada IEC 60098.

orden de los 5 mV. Por lo tanto, la ganancia requerida es del orden de los 40 a 50 dB, lo que permite llevar estas señales a valores de 1 V de amplitud.

La respuesta en frecuencia del circuito debe seguir la recomendada por R.I.A.A. vista anteriormente en la Fig. 14. Esto implica que un amplificador con 40 dB de ganancia en 1 kHz tendrá en baja frecuencia una ganancia de 60 dB y en alta frecuencia una ganancia de 20 dB. Existen diversos circuitos que implementan este filtro utilizando componentes activos o pasivos.

El preamplificador deberá tener capacidad de manejo de potencia, ya que se encuentran discos con velocidades de pico 100 cm/seg (100 mV) que provocarían que el mismo se sobrecargue. Para ello, el preamplificador debe poder recuperarse casi instantáneamente evitando distorsiones audibles. Este factor se mide en dBm¹³ y se requiere que el preamplificador pueda ofrecer un adicional de 20 a 30 dBm. Algunos fabricantes lo informan en mV como voltaje de sobrecarga.

El ruido producido por el cabezal y el medio de grabación requieren que el ruido del preamplificador se encuentre 70 dB por debajo de la señal de entrada promedio de 10 mV.

Hemos visto que podemos encontrar cabezales fonocaptos de imán móvil (IM) y de bobina móvil (BM) cómo los más habituales y que los de BM entregan señales del orden de los 0,1 a 0,6 mV. Por ende, se requerirá de una etapa de ganancia adicional de 20 dB de muy bajo ruido.

Otro factor importante es la adaptación de impedancia del cabezal con la entrada del preamplificador. Los cabezales de IM requieren de impedancias de carga de 47 K Ω y muy baja carga capacitiva. Vale aclarar, que la carga capacitiva, incluye también lo aportado por los cables y conectores involucrados en el sistema. Mientras que los cabezales de BM requieren impedancias mucho menores del orden de los 75 a 100 Ω .

7. Adaptación de niveles de señal

Es habitual que los preamplificadores fonográficos encontrados en el mercado, estén

¹³ Relación de potencia expresada en decibeles (dB) relativa 1 mW.

diseñados para trabajar en sistemas de sonido hogareños entregando en su salida voltajes del orden de los $316 \text{ mV}_{\text{rms}}$ (-10 dBV^{14}), conocido como nivel de línea de consumidor. Al momento de realizar la migración al dominio digital, es altamente probable que el conversor análogo-digital (A/D) utilizado requiera niveles de señal superiores (de nivel profesional), del orden de $1,2 \text{ V}_{\text{rms}}$ ($+4 \text{ dBU}^{15} = +1,78 \text{ dBV}$).

Esto requerirá de una nueva etapa de amplificación que brinde una ganancia de $11,78 \text{ dB}$ extras. Podrá corresponder a un preamplificador independiente o estar incorporada dentro del dispositivo de conversión A/D. Además, dado que esto significa el agregado de una nueva etapa en la cadena de migración, esta deberá presentar muy alta relación señal-nivel de ruido ($>95 \text{ dB}$), baja distorsión armónica total ($< 0,008 \%$) y una impedancia de entrada del orden de $1,2 \text{ k}\Omega$.

8. Metodología para la preparación del reproductor de discos

Hemos visto que el reproductor de discos es un componente complejo e importante en la cadena de migración y además presenta varios parámetros que deben ser alineados y calibrados. Es así, que para obtener una fiel lectura de la información sonora, tanto para la adecuada reproducción del soporte, como así también obtener una copia digital para su preservación (y eventualmente someterlo a procesos de restauración en el dominio digital), a continuación planteamos una serie de pasos metodológicos a realizar para alcanzar el objetivo propuesto.

1. Entorno y operador

El proceso de migración debe hacerse en un entorno con temperatura controlada y estable. El recinto debe estar bien iluminado y el operador debe evitar el uso de pulseras, anillos y ropas sueltas que puedan enganchar alguna parte del reproductor.

2. Ubicación del reproductor

El mismo debe estar apoyado sobre una mesa de trabajo firme, con superficie plana y lisa. Preferentemente, la misma no debe presentar vibraciones causadas por el edificio u otro equipamiento cercano.

¹⁴ Relación de voltaje expresada en decibeles relativa a 1 V .

¹⁵ Relación de voltaje expresada en decibeles relativa a $0,775 \text{ V}$.

3. Nivelación del plato

Instalar la manta¹⁶ sobre el plato y utilizar un medidor de nivel apoyado sobre la superficie del mismo, se debe verificar que el mismo se encuentre en posición horizontal en ambos ejes del plano. La mayoría de los reproductores presentan regulación en los apoyos del plato o en los apoyos del reproductor. En caso de no presentar estas regulaciones, utilizar suplementos.

4. Velocidad de rotación del plato

Colocar un disco de vinilo de similares características (diámetro, espesor, material) al que se quiere preservar y encender el reproductor para que el plato comience a girar. Configurar el selector de velocidad en el parámetro de reproducción deseada. Utilizar alguno de los métodos propuestos en el ítem Prueba de velocidad de rotación para verificar que la misma sea correcta y estable. En caso de presentar variaciones y si el reproductor cuenta con variador de velocidad (pitch), se deben hacer los ajustes necesarios para establecer la velocidad correcta.

5. Pre-ajuste de la fuerza vertical de seguimiento

Este ajuste debe realizarse con el cabezal fonocaptor y la púa instalada sin su protector correspondiente. Si el reproductor dispone de ajuste de fuerza lateral (anti-skating) esta fuerza debe estar en la posición de valor nulo. El primer paso consiste en balancear el brazo haciendo rotar el contrapeso de manera que el conjunto se mantenga estable en posición horizontal. Luego se debe hacer rotar la escala que el contrapeso presenta a la posición cero. Esta escala está calibrada en gramos e indica cuanto peso se aplicará sobre la púa, el que depende de cada tipo, marca y modelo. Esta información debe ser provista por el fabricante y puede ser encontrada en la hoja de especificaciones de la púa. Generalmente el fabricante no provee un peso específico, sino que brinda un rango. Dado que este es un pre-ajuste, es recomendable utilizar un peso que se encuentre en el medio del rango. Por último, rotar todo el conjunto (contrapeso y escala) en sentido horario hasta la posición que aplique el peso deseado¹⁷.

¹⁶ El uso de la manta es importante ya que actúa como amortiguador de resonancias sobre la superficie del disco. Esta debe ser preferentemente gruesa y pesada (Copeland, 2008).

¹⁷ Es recomendable utilizar una balanza digital de precisión para verificar el peso aplicado.

6. Alineación de conjunto brazo-cabezal fonocaptor

Para la alineación del conjunto se recomienda utilizar los patrones de alineación especialmente diseñados a tal fin y que responden a las ecuaciones de Lögfren y Baerwald¹⁸. Se recomienda imprimir este patrón, sin variar la escala, y en máxima calidad sobre un cartón delgado. Luego de la impresión, se debe verificar que la escala no fue modificada midiendo la distancia entre A y A'. Posteriormente se debe realizar la perforación que permite alinear este patrón con el eje del plato. Retirar el disco de vinilo, posicionar el patrón de alineación y ubicar la púa sobre el punto O. Utilizando las líneas de referencia verificar que los laterales del cabezal, y por ende la púa, estén alineados con las mismas (Fig. 15). En caso de no encontrarse alineados, se deben utilizar los ajustes brindados por el cabezal y modificar su posición. Antes de ajustar los tornillos/tuercas, verificar que en la posición O' también se presenta una correcta alineación. Para ello es necesario hacer rotar el plato con la mano. La configuración ideal es que en ambas posiciones se consiga la alineación exacta. En caso de que no se alcance el objetivo se debe buscar una solución de compromiso entre ambas posiciones.

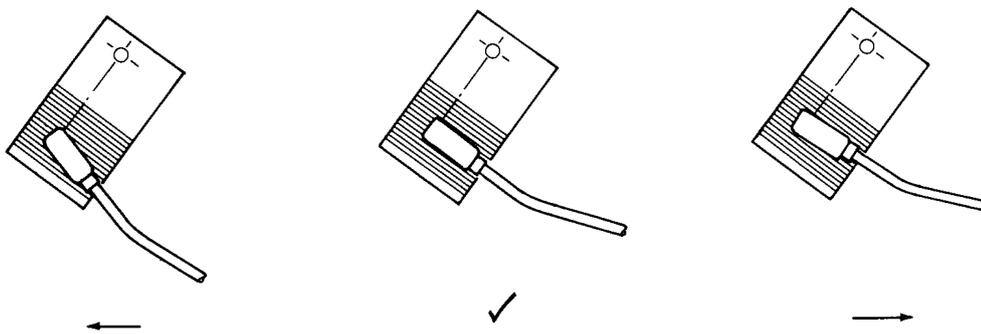


Fig 15. Alineación de cabezal con guías de referencia en patrón de calibración.

7. Alineación del azimuth

Existe una técnica que utiliza discos con señales de prueba especiales, difíciles de conseguir, y con la ayuda de un voltímetro permiten ajustar este parámetro. Aquí proponemos utilizar una técnica de alineación visual con la ayuda de un

¹⁸ Los patrones pueden ser descargados de <http://www.vinylengine.com/cartridge-alignment-protractors.shtml>

espejo el cuál se apoya horizontalmente sobre el plato. Luego se posiciona el cabezal sobre este y se observa que el mismo y su reflejo vistos de frente estén totalmente alineados (Fig. 16).

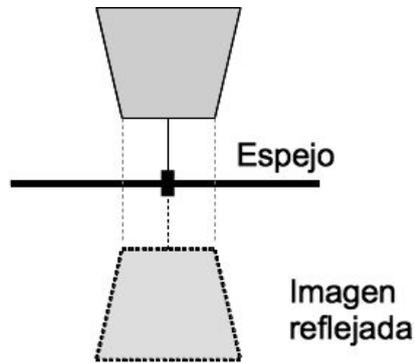


Fig 16. Alineación de azimuth

8. Ajuste de la fuerza lateral (anti-skating)

Se sugiere realizar este ajuste utilizando un disco de vinilo en blanco (sin surco con la superficie lisa) o un disco compacto (CD). El procedimiento consta en hacer rotar el plato a la velocidad de reproducción deseada y posicionar la púa sobre la superficie lisa del disco. Al estar, inicialmente, la fuerza lateral con valor nulo, la púa tenderá a desplazarse hacia el centro del disco. Luego, debemos incrementar la fuerza lateral hasta que compense la fuerza de patinaje y la púa quede siempre sobre el mismo radio. Se debe tener mucha precaución de no dañar la púa. Para verificar la configuración, se sugiere reproducir un disco y observar la púa desde el frente para detectar si este tiene tendencia a flexionarse hacia el centro o exterior del disco.

9. Configuración de ángulo de seguimiento vertical

Los fabricantes de cabezales los diseñan de manera que la púa y sus soporte estén a 20° respecto a la superficie del disco. Es por ello que la recomendación para la configuración de este ángulo se basa en que el porta cabezal y brazo se encuentren paralelos al plato, siempre y cuando el cabezal no presente algún suplemento que modifique su ángulo respecto al porta cabezal.

Para aplicar este ajuste, es necesario que tanto la manta a utilizar como el disco estén sobre el plato. Se recomienda utilizar una regla milimetrada que permita

medir la separación del brazo respecto al disco en dos puntos. Si las mediciones son distintas es porque el brazo no se encuentra paralelo. Para corregir este parámetro, se depende de las opciones de variación de la altura de la base del brazo. En caso de no presentarse esta opción, se puede recurrir a cambiar el espesor de la manta del plato.

10. Ajuste de la fuerza de seguimiento vertical

Luego de la serie de procesos realizados, es posible que haya habido cambios en la fuerza de seguimiento vertical, ya sea por modificaciones mecánicas o por sólo el hecho de haber estado manipulando el brazo.

Se recomienda verificar el peso aplicado utilizando la balanza de precisión digital.

11. Audición del disco previo a la migración

Esta etapa es de carácter subjetivo, ya que el operador debe evaluar la calidad sonora del registro basándose en su experiencia previa, datos técnicos que haya podido conseguir, conocimiento musical y conocimiento de la performance del sistema de reproducción¹⁹.

12. Documentación

Debe plantearse un procedimiento para la documentación del sistema de reproducción utilizado donde debe quedar registrada la cadena del sistema de reproducción, la configuración de los parámetros y como se ajustaron o seleccionaron, además de alguna observación personal por parte del operador.

Se sugiere que esta documentación se almacenada en formato digital en formato de texto plano (ASCII).

8.1. Reglas generales y sus efectos

Según L. Walker (s.f.) se deben seguir algunas reglas generales para el ajuste fino de algunos de los parámetros antes mencionados, basadas en la audición del material sonoro.

¹⁹ Esto incluye el entorno acústico y el sistema electroacústico utilizado para la audición.

Ángulo de seguimiento vertical

- Si se aumenta el ángulo, las altas frecuencias mejoran. Si se aumenta mucho, las bajas frecuencias se pierden.
- Si el ángulo se disminuye, las bajas frecuencias se hacen más intensas y las altas frecuencias se atenúan.

Fuerza de seguimiento vertical

- El aumentar esta fuerza, usualmente mejora el rango de medias-bajas y bajas frecuencias.
- El disminuir esta fuerza mejora las altas frecuencias pero puede incrementar el rango de los medios. Las bajas frecuencias pueden distorsionarse y la púa no seguirá el surco de forma correcta.

9. Conclusiones

Todos los componentes involucrados en la reproducción y migración de la señal sonora registrada en el disco de vinilo constituyen un sistema en la medida en que son un conjunto de dispositivos interconectados que procesan señales influyéndose mutuamente en mayor o menor medida. Y de este sistema, la etapa analógica constituye un sub-sistema con parámetros cuya integridad afecta dramáticamente el resultado lo cual justifica haber realizado un estudio tan detallado de los mismos.

Hemos visto todos los componentes involucrados en la cadena analógica y su interrelación, así como cada uno de sus parámetros y características. La configuración correcta del sistema minimiza los errores que pueden aparecer en la reproducción (ruidos, distorsión), y por ende, permite obtener una copia tan fiel como sea posible de la original. A continuación, a modo de conclusión se proponen los pasos a seguir:

- 1-Preparación del material a preservar
- 2-Alineación del reproductor de discos de vinilo
- 3-Configuración de preamplificador
- 4-Configuración de nivel de etapa de entrada conversor analógico-digital
- 5-Monitorización de la reproducción y evaluación de la calidad objetiva y subjetiva del programa musical
- 6-Modificación de parámetros de configuración y alineación en caso de ser necesario

Si bien, en este trabajo no abordamos las características de la etapa digital involucrada en la migración, resulta evidente de lo analizado que el sistema debe permitir registrar la señal con una relación señal ruido mayor a los 95 dB para lo cual, aparentemente, sería suficiente muestrear a 16 bits de resolución (96 dB). Pero debido a la posibilidad de realizar post-procesamientos en el entorno digital, restauración, etc., y almacenamiento de archivo en alta calidad de audio es recomendable muestrear con una resolución de al menos 24 bits (144 dB).

Pero la señal a preservar podría contener información enmascarada por el ruido complejo de superficie, que en futuras tecnologías pueda recuperarse, es por ello que la frecuencia de muestreo del conversor analógico-digital debería ser superior a 48 kHz de forma de registrar el mayor rango de frecuencias posibles.

Referencias

- Alexandrovich, G. (1987). Disk Recording and Playback. En G. Ballou (Ed.), *Handbook for Sound Engineers* (pp. 823 - 932). Indianápolis, Indiana: Howard W. Sams & Company.
- Baerwald, H. (1941, Diciembre). Analytic Treatment of Tracking Error and Notes on Optimal Pick-Up Design. *Journal of the Society of Motion Pictures Engineers*.
- Copeland, P. (2008). *Manual of Analogue Sound Restoration Techniques*. Londres: The British Library.
- Dirjish, M. (2012, Abril 4). *What's The Difference Between Moving Magnet, Coil, And Iron Cartridges For Turntables?* Recuperado en Marzo 19, 2014, desde Electronic Design: <http://electronicdesign.com/components/what-s-difference-between-moving-magnet-coil-and-iron-cartridges-turntables>
- Giles, M. (1980). *Audio/Radio Handbook*. National Semiconductors.
- Harley, R. (2007, Junio/Julio). An LP Primer. How the LP Works. *The Absolut Sound Magazine* , pp. 35-39.

Howard, K. (2009, Abril 2). *Cut and Thrust: RIAA LP Equalization*. Recuperado en Marzo 10, 2014, desde Stereophile:
http://www.stereophile.com/features/cut_and_thrust_riaa_lp_equalization/index.html

Howard, K. (2010, Abril 8). *Arc Angles: Optimizing Tonearm Geometry*. Recuperado en Marzo 10, 2014, desde Stereophile:
http://www.stereophile.com/reference/arc_angles_optimizing_tonearm_geometry/index.html

IEC 60098. (1987). *Analogue audio disk records and reproducing equipment*. International Electrotechnical Commission. Ginebra, Suiza.

Keywood, N. (1979). *Vertical Tracking Angle*. Recuperado en Marzo 17, 2014, desde Hi-Fi Answers: <http://www.hi-fiworld.co.uk/vinyl-lp/37-technology/73-vertical-tracking-angle.html>

Keywood, N. (1979). *Arm Geometry*. Recuperado en Marzo 19, 2014, desde Hi-Fi World: <http://www.hi-fiworld.co.uk/index.php/vinyl-lp/37-technology/71-arm-geometry.html>

Löfgren, E. (1938). On the Non-Linear Distortion in the Reproduction of Phonograph Records Caused by Angular Deviation of the Pickup Needle. *Akustische Zeitschrift* , 3, 350-362.

Markowitz, G. (n.d.). *Understanding The Issues Behind Cartridge Alignment*. Recuperado en Marzo 19, 2014, desde Vinyl Zone:
<http://www.recordcollectorsguild.org/modules.php?op=modload&name=Sections&file=index&req=viewarticle&artid=44&page=1>

Percy, W. (1924, Octubre). Needle Track Alignment. *The Gramophone* , pp. 167-169.

Percy, W. (1924, Septiembre). Needle Track Alignment. *The Gramophone* , pp. 129-131.

Protractor User Guide. (2005). Recuperado en Marzo 12, 2014, desde Vinylengine:
<http://www.vinylengine.com/protractor-user-guide.shtml>

Walker, L. (s.f.). *Fine Tuning Your Turntable*. Recuperado en Marzo 12, 2014, desde
Walker Audio: <https://walkeraudio.com/lloyd-walker-on-fine-tuning-your-turntable/>