



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**DISEÑO DE UN AFINADOR MUSICAL DIGITAL
POR MEDIO DE MATLAB**

Detlev André Chafchalaf Peña

Asesorado por la Inga. Ingrid Salomé Rodríguez de Loukota

Guatemala, junio de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE UN AFINADOR MUSICAL DIGITAL
POR MEDIO DE MATLAB**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

DETLEV ANDRÉ CHAFCHALAF PEÑA

ASESORADO POR LA INGA. INGRID SALOMÉ RODRÍGUEZ DE LOUKOTA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRÓNICO

GUATEMALA, JUNIO DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Luis Eduardo Durán Córdova
EXAMINADOR	Ing. José Aníbal Silva de los Ángeles
EXAMINADOR	Ing. Marvin Marino Hernández Fernández
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO DE UN AFINADOR MUSICAL DIGITAL POR MEDIO DE MATLAB

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 4 de mayo de 2012.



Detlev André Chafchalaf Peña



Ref. EIME 19.2013.
Guatemala, 22 de FEBRERO 2013.

Señor Director
Ing. Guillermo Antonio Puente Romero
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

**Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
“DISEÑO DE UN AFINADOR MUSICAL DIGITAL POR MEDIO
DE MATLAB”, del estudiante Detlev André Chafchalaf Peña,
que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.**

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Carlos Eduardo Guzmán Salazar
Coordinador Área Electrónica



S/O

Guatemala 25 de febrero del 2013

Ingeniero
Carlos Eduardo Guzmán Salazar
Coordinador del Área de Electrónica
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

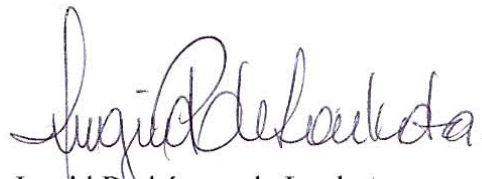
Estimado Ingeniero Guzmán.

Me permito dar aprobación al trabajo de graduación titulado: **“DISEÑO DE UN AFINADOR MUSICAL DIGITAL POR MEDIO DE MATLAB”**, del señor **Detlev André Chafchalaf Peña**, por considerar que cumple con los requisitos establecidos.

Por tanto, el autor de este trabajo de graduación y, yo, como su asesora, nos hacemos responsables por el contenido y conclusiones del mismo.

Sin otro particular, me es grato saludarle.

Atentamente,



Inga. Ingrid Rodríguez de Loukota
Colegiada 5,356
Asesora

Ingrid Rodríguez de Loukota

Ingeniera en Electrónica

Colegiado 5356



REF. EIME 19 2013.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; DETLEV ANDRÉ CHAFCHALAF PEÑA titulado: "DISEÑO DE UN AFINADOR MUSICAL DIGITAL POR MEDIO DE MATLAB" procede a la autorización del mismo.


Ing. Guillermo Antonio Puente Romero



GUATEMALA, 30 DE ABRIL 2,013.

Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 398 .2013

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE UN AFINADOR MUSICAL DIGITAL POR MEDIO DE MATLAB**, presentado por el estudiante universitario: **Detlev André Chafchalaf Peña**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano

Guatemala, 11 de junio de 2013

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

Mi familia

**Toda persona que tenga
aprecio por la música**

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por darme la vida y la oportunidad de elaborar este trabajo.
Mis padres	Porque gracias a su esfuerzo y sacrificio tuve la oportunidad de estudiar.
La Universidad de San Carlos de Guatemala	Por todos los conocimientos adquiridos a lo largo de mi vida universitaria.
Departamento de Física de la Facultad de Ingeniería	Por brindarme oportunidades que de otra manera no hubiera podido aprovechar.
Mis amigos de la facultad	Por su constante apoyo y compañía.
Inga. Ingrid Rodríguez de Loukota	Por su paciencia, consejo, asesoría y las oportunidades que me ha brindado a lo largo de mi carrera.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. FÍSICA DEL SONIDO Y TEORÍA MUSICAL	1
1.1. Modelado del sonido	1
1.2. Percepción humana del sonido	3
1.3. Propiedades del sonido	5
1.3.1. Tono o frecuencia.....	5
1.3.2. Sonoridad	5
1.3.3. Timbre	6
1.3.4. Percepción de duración	6
1.3.5. Envolvente o articulación.....	7
1.3.6. Difusión.....	8
1.4. Teoría musical.....	8
1.4.1. Tonalidad.....	9
1.4.2. Escala cromática	10
2. COMPONENTES DEL SISTEMA.....	13
2.1. Guitarra acústica	13
2.1.1. Estructura	13
2.1.2. Funcionamiento	15

2.1.3.	Cavidad de Helmholtz	16
2.1.4.	Frecuencias abiertas	17
2.1.5.	Afinación	17
2.1.5.1.	Método de afinación 1	20
2.1.5.2.	Método de afinación 2	21
2.1.5.3.	Método de afinación 3	22
2.2.	Micrófonos de audio	23
2.2.1.	Clasificación de los micrófonos de audio	23
2.2.1.1.	Clasificación por patrones de polaridad	23
2.2.1.1.1.	Omnidireccionales	24
2.2.1.1.2.	Direccionales	25
2.2.1.1.3.	Bidireccionales	27
2.2.1.2.	Clasificación por el tipo de transductor	28
2.2.1.2.1.	Condensador	29
2.2.1.2.2.	Dinámicos	31
2.2.1.2.3.	<i>Ribbon</i>	32
2.3.	Tarjeta de sonido	34
2.4.	Selección de componentes	34
3.	PROCESAMIENTO DIGITAL	37
3.1.	Procesamiento digital de señal	37
3.2.	MATLAB	40
3.3.	Señales en tiempo discreto	41
3.3.1.	Sistemas discretos	41
3.3.1.1.	Sistemas lineales	41
3.3.1.2.	Sistemas lineales de tiempo invariante (LTI)	42

3.4.	Transformada discreta de Fourier (DFT)	43
3.4.1.	Propiedades de la DFT en el tiempo	44
3.4.2.	Transformada rápida de Fourier (FFT)	45
3.4.2.1.	Algoritmo raíz-2	46
3.4.3.	Teorema de muestreo	47
3.5.	Filtros digitales	47
3.5.1.	Filtros FIR	48
3.5.2.	Filtros IIR	48
4.	CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA	49
4.1.	Resumen técnico del afinador	49
4.2.	Rango de operación	51
4.3.	Frecuencia de muestreo	51
4.4.	Parámetros del filtro anti <i>aliasing</i>	53
4.5.	Directorio de búsqueda	53
4.5.1.	Intervalos porcentuales de frecuencia	53
4.5.2.	Vector de respuesta	57
4.6.	El micrófono como filtro pasabajos	58
4.7.	Interrupción del código cíclico	59
	CONCLUSIONES	61
	RECOMENDACIONES	63
	BIBLIOGRAFÍA	65
	APÉNDICE	67

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Movimiento armónico simple.....	2
2.	Diferencia de fase entre dos movimientos armónicos	2
3.	Sensibilidad de la membrana basilar.....	4
4.	Una octava en el teclado del piano	10
5.	Partes físicas de una guitarra acústica típica	13
6.	Método de afinación 1	20
7.	Método de afinación 2	21
8.	Método de afinación 3	22
9.	Patrón omnidireccional.....	24
10.	Patrón cardioide	26
11.	Patrón supercardioide	26
12.	Patrón hipercardioide	27
13.	Patrón bidireccional.....	28
14.	Estructura interna del micrófono de condensador	29
15.	Estructura interna del micrófono dinámico	31
16.	Estructura interna del micrófono <i>ribbon</i>	33
17.	Diagrama de bloques de un procesador analógico	37
18.	Diagrama de bloques de un procesador digital	38
19.	División porcentual de una nota musical en el espectro.....	54
20.	División porcentual de frecuencias para la nota La (Hz)	57

TABLAS

I.	Frecuencia base de las notas musicales	12
II.	Frecuencias abiertas.....	17
III.	División porcentual entre notas musicales (Hz)	55

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
Hz	Hercios
mm	Milímetro
A	Nota musical La
B	Nota musical Si
C	Nota musical Do
D	Nota musical Re
E	Nota musical Mi
F	Nota musical Fa
G	Nota musical Sol

GLOSARIO

Algoritmo	Serie de pasos ordenados en los que se ejecuta con éxito una acción.
<i>Aliasing</i>	Efecto que causa que un conjunto de señales se tornen indistinguibles cuando se muestrean, lo que no permite su entera recuperación o reconstrucción.
Código	Conjunto de instrucciones escritas con la adecuada sintaxis para un programa de computadora.
Coeficientes	Número que se multiplica a una variable significativa para escalar los valores que puede tomar.
Convolución	Término matemático designado a la operación de multiplicar dos señales.
Dependencia cuadrática	Que depende matemáticamente de un término de segundo grado o de potencia dos.
DFT	Transformada discreta de Fourier. Transformada de Fourier que se aplica a señales no continuas.
Diapasón	Dispositivo metálico con forma de horquilla que emite un tono musical puro.

Entorchado	Proceso en el que un hilo de cierto material se cubre con un hilo metálico.
Espectro de frecuencias	Gráfico que muestra la descomposición de una señal ondulante en el dominio de la frecuencia.
FFT	Transformada rápida de Fourier, conjunto de algoritmos que calculan eficientemente la transformada de Fourier en un microprocesador.
Filtro	Sistema que discrimina información que posee características no deseadas.
Hardware	Partes físicas de una computadora o dispositivo electrónico.
Interfaz gráfica de usuario (GUI)	Entorno visual en el que una persona se comunica con una máquina e intercambia información.
LTI	Sistema lineal e invariante en el tiempo.
Membrana basilar	Membrana interna del oído responsable de percibir el sonido en un intervalo de frecuencias.
Microprocesador	Sistema digital, con capacidad para interpretar instrucciones y procesar datos, especificados por un programa.

Movimiento armónico simple	Movimiento periódico que representa las variaciones de la función matemática seno al variar el arco.
Normalización	Regla para redimensionar o estandarizar el tamaño de algo de acuerdo a ciertas especificaciones.
Nota bemol	Nota musical cuya entonación es inferior a la natural en un semitono.
Nota sostenido	Nota musical cuya entonación es superior a la natural en un semitono.
Nilón	Fibra textil sintética que tiene muchas aplicaciones.
Registro de corrimiento	Desplazamiento de unidades binarias de información entre celdas binarias de memoria adyacentes.
Resonador	Aparato que hace resonar o que resuena.
Resonancia	Sonido que resulta de la repercusión de otro y lo acompaña.
Script	Código del que está compuesto un programa simple de computadora.
Sistema digital	Sistema que trabaja con información que está basada en números.

Sistema analógico	Sistema que trabaja con información en el mismo formato en el que es recibida.
Software	Conjunto de programas o componentes lógicos que realizan tareas específicas en una computadora.
SPL	Nivel de presión sonora, determina la intensidad del sonido que alcanza a una persona en un momento dado.
Transductor	Medio en el que una forma de información se transforma en otra de otro tipo.
Vector	Conjunto de variables del mismo tipo cuyo acceso se realiza por índices.
VLSI	Integración a muy grande escala. Es la integración de una inmensa cantidad de circuitos en un solo chip. El microprocesador es un dispositivo de este tipo.

RESUMEN

El presente trabajo de graduación consta de cuatro capítulos. En el capítulo I, se explica la naturaleza del sonido y su modelado matemático. Se incluye una breve teoría musical para preparar el ambiente lingüístico musical que se presenta en los demás capítulos.

En el capítulo II, se describe los componentes físicos necesarios para el afinador. En este caso, se entra en detalle con la guitarra, el micrófono, y la tarjeta de sonido de la computadora, que convertirá la señal recibida por el micrófono en una señal digital, más conveniente para su procesamiento. Al final del capítulo se seleccionan los componentes y se dan razones para su selección.

El capítulo III está dedicado al procesamiento digital, se describen los algoritmos en los que está basado la parte más importante de procesamiento del afinador. Se incluye la parte matemática más importante y con mayor nivel de complejidad. Además, se dan a conocer algunos detalles sobre las capacidades del programa MATLAB.

El capítulo IV es el más valioso, pues en él, se explica el funcionamiento a profundidad del afinador, se incluyen los detalles más importantes que lo hacen trabajar eficientemente, y se da una solución detallada a los problemas más representativos. En el apéndice se incluye el manual de usuario del afinador digital.

OBJETIVOS

General

Diseñar un afinador musical digital, para guitarras en general, a través del software MATLAB, que pueda ejecutarse en computadoras con procesadores de propósito general.

Específicos

1. Conseguir que el sistema sea apto para trabajar con los recursos de hardware de menor eficacia en el mercado actual; de modo que pueda ejecutarse en cualquier ordenador.
2. Implementar los algoritmos necesarios en el software de la aplicación, para optimizar el tiempo de respuesta del afinador y acercarlo a funcionar en tiempo real.
3. Dar a conocer los factores que se deben tomar en cuenta durante el procesado digital de sonido, y específicamente, al hacerlo en MATLAB.
4. Desarrollar un *script* e interfaz gráfica en MATLAB, que permita al usuario, con pocos conocimientos de música, afinar una guitarra acústica fácilmente.

INTRODUCCIÓN

El actuar diario de una persona se rige por la forma en que interpreta la gran cantidad y variedad de señales que recibe. Tales interpretaciones se ven afectadas por una gran serie de factores; pero principalmente, requieren que la persona tenga la capacidad para percibir óptimamente las señales, procesarlas rápidamente en su cerebro, discriminar las partes que no sean de interés, y luego tomar una decisión en base a los resultados. A veces, el cerebro no está lo suficientemente entrenado para trabajar en alguna actividad específica. O bien, puede que existan limitaciones físicas en la persona que no le permitan interpretar correctamente las señales necesarias para el desempeño de una tarea.

Es allí donde se ve la necesidad de procesar señales por otros medios, más eficientes, para tomar decisiones más acertadas. Para ello, se utiliza comúnmente instrumental electrónico, que en su mayoría, incluyen un microprocesador. Estos pequeños dispositivos son el cerebro de cada aparato electrónico. Tienen la capacidad de realizar miles de operaciones matemáticas en una minúscula fracción de segundo. La invención de los microprocesadores permitió reducir enormemente el tamaño de los circuitos finales, que de cualquier otra forma hubieran complicado su implementación en plataformas con reducido espacio de trabajo.

Como una aplicación moderna, y haciendo uso de una computadora, como cerebro para el procesamiento, se elaboró el diseño de un afinador digital para guitarra. La elección de la aplicación se hizo como una forma de enlazar la música con la electrónica, ambos gustos del autor. Por otro lado, a los

guitarristas principiantes se les dificulta siempre la afinación de la guitarra. Y aunque existen tutoriales escritos sobre el asunto, nada mejor que tener algo a la mano que puede simplificar el proceso y ser de mucha ayuda. Debido a la matemática que requiere la aplicación, su *script* correspondiente se desarrolló en MATLAB, un software con capacidades dedicadas para operaciones matemáticas de gran complejidad.

En este trabajo de graduación, se describe la elaboración del diseño de un afinador musical digital, para confirmar la superioridad de los sistemas digitales sobre los sistemas analógicos. El diseño incluye una interfaz gráfica que permite al usuario afinar una guitarra de acuerdo a las vibraciones, emitidas por cada cuerda, que son percibidas por un micrófono.

Este afinador es un simulador de un oído que indica, con suficiente precisión, si es necesario apretar o aflojar las clavijas de una guitarra para agregar o quitar tensión a las cuerdas. Su principal objetivo es que las cuerdas resulten afinadas a su tono natural o de concierto. Se incluye un segundo modo de afinación que permite afinar una cuerda a cualquier nota dentro de sus límites físicos de operación. La matemática que hace posible su funcionamiento, la transformada rápida de Fourier (FFT), se describe con mayor detalle. En cuanto al procesado de audio en MATLAB, se incluye la solución a los problemas más trascendentales implicados durante el desarrollo de la aplicación.

También se incluyen: la teoría musical básica y su fuerte relación con la matemática, varios métodos para afinar una guitarra, recomendaciones para el usuario que mejorarán el desempeño del sistema y un manual de usuario para el uso del afinador.

Los resultados obtenidos fueron satisfactorios, se puso a prueba la aplicación en computadoras con distintos procesadores y se obtuvo el resultado deseado, el programa respondió rápidamente. También se verificó su funcionalidad, para ello se seleccionaron individuos con diferentes niveles de conocimiento de música y se les explicó el funcionamiento básico requerido por el programa; los resultados también fueron los deseados, pues una de las intenciones fundamentales de la aplicación es que sea fácil de utilizar y que al usuario le sea fácil afinar.

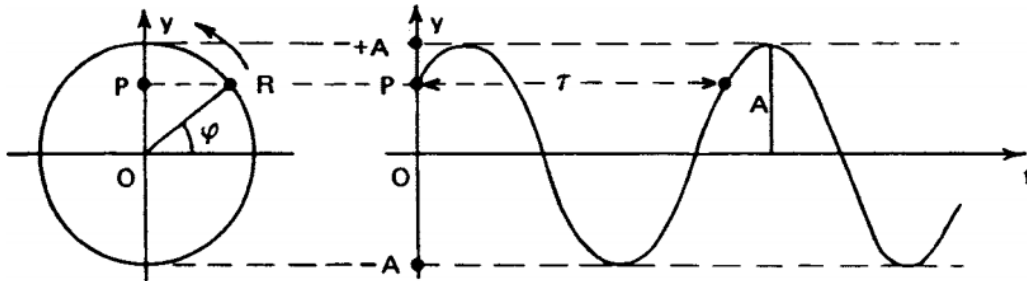
1. FÍSICA DEL SONIDO Y TEORÍA MUSICAL

1.1. Modelado del sonido

Un ser humano percibe un sonido cuando el tímpano del oído es puesto en un movimiento característico denominado vibración. Esta vibración es causada por una fuente de sonido que hace pequeños cambios de presión en el aire para propagarse. Cuando un patrón de vibración se repite en intervalos de tiempo iguales se conoce como movimiento periódico. El intervalo de tiempo en el que el patrón de movimiento se repite es llamado período y es denotado por la letra griega tau (τ).

Uno de los movimientos periódicos más simples de ejemplificar es el de un péndulo. Una característica del mismo es que puede ser representado como la proyección del movimiento de un círculo uniforme sobre un diámetro del círculo, como en la figura 1. A esta proyección se le conoce como movimiento armónico simple y también es llamado movimiento sinusoidal porque puede ser representado por una función trigonométrica llamado seno.

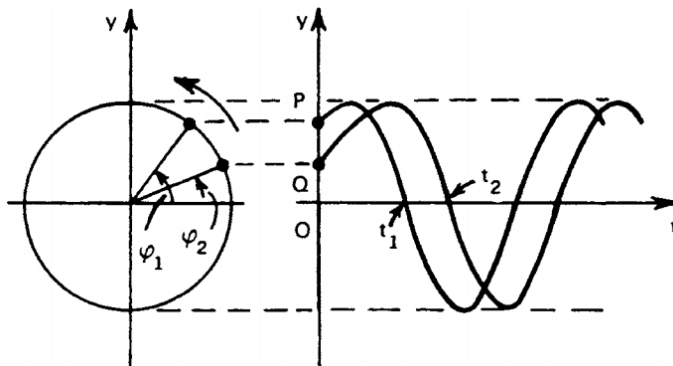
Figura 1. **Movimiento armónico simple**



Fuente: ROEDERER, Juan. The physics and psychophysics of music. p. 26.

Algunas características del movimiento sinusoidal es que el tamaño de la onda está limitado por su amplitud, el intervalo en el que el movimiento circular se repite lo determina el período. Si el movimiento de la figura 1 comenzara en otro punto del círculo, habría una diferencia entre posiciones angulares. A la diferencia respecto del patrón se le denomina fase del movimiento armónico simple, la cual se puede apreciar en la figura 2.

Figura 2. **Diferencia de fase entre dos movimientos armónicos**



Fuente: ROEDERER, Juan. The physics and psychophysics of music. p. 27.

La importancia del movimiento sinusoidal es que cualquier forma de movimiento periódico puede ser descrita como la suma de vibraciones armónicas simples.

1.2. Percepción humana del sonido

Una cantidad que es utilizada con mayor frecuencia que el periodo τ , es la frecuencia:

$$f = 1/\tau$$

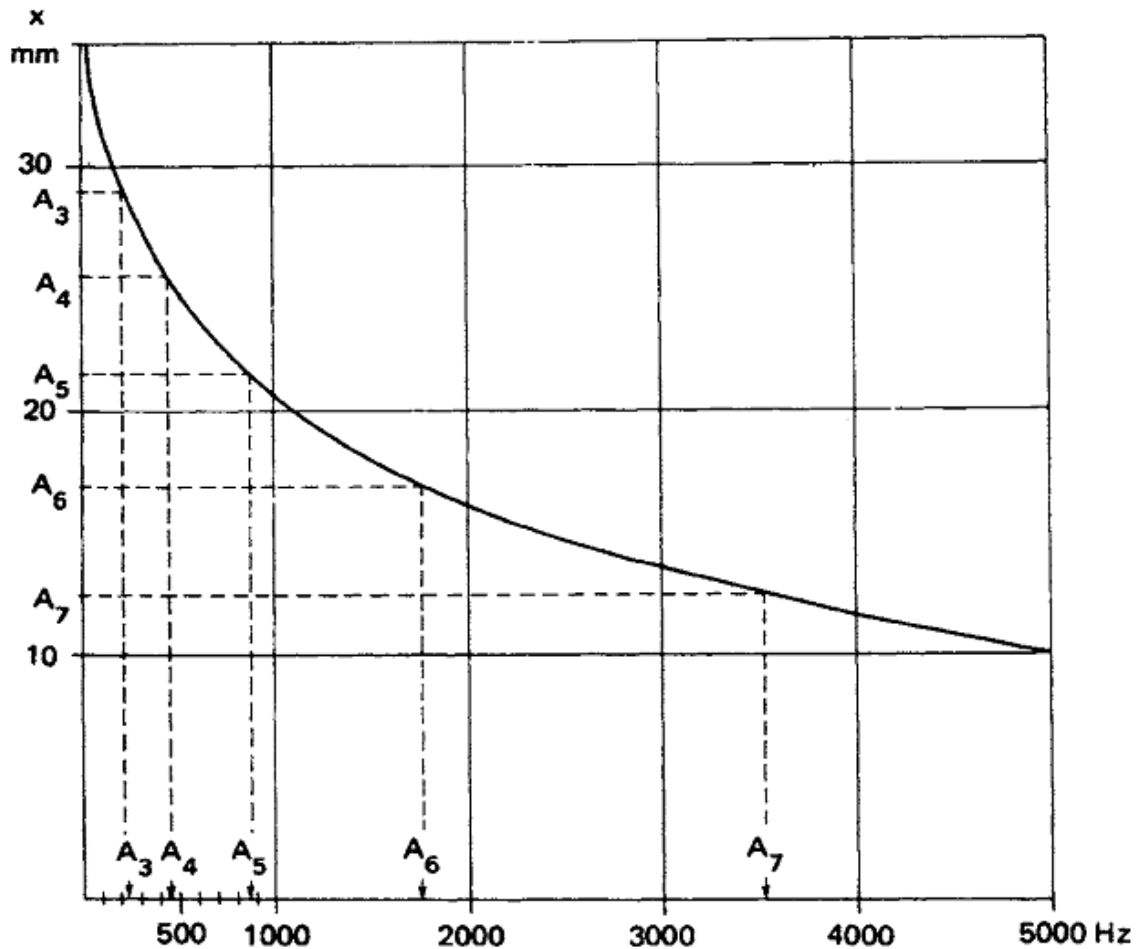
La frecuencia representa en número de repeticiones de un patrón por unidad de tiempo y se mide en hercios (Hz). La razón por la que se prefiere utilizar el término frecuencia se debe a que un aumento de frecuencia es percibido por el humano como un aumento en la agudeza o altura del sonido. Una persona normal puede percibir frecuencias entre 20 y 15,000 Hz.

Un sonido armónico simple con características constantes (frecuencia, amplitud y fase) es denominado como tono puro. La música no está hecha de tonos puros. Sin embargo, para llegar a comprender la manera en que la que el ser humano percibe el sonido musical, es recomendable partir de los efectos que se acontecen dentro del oído producidos por tonos puros.

En el oído interno se encuentra la membrana basilar, que tiene una longitud de 34 mm de longitud y alrededor de 30,000 unidades receptoras llamados cilios. Los cilios son unos pelos minúsculos que entran en movimiento cada vez que una parte de la membrana vibra. Cuando los cilios actúan, envían pequeñas señales eléctricas al nervio auditivo. Colectivamente, todo esto forma parte del sonido en nuestro cerebro. Las vibraciones en la membrana basilar

están divididas de acuerdo a las frecuencias que componen el sonido que se percibe.

Figura 3. **Sensibilidad de la membrana basilar**



Fuente: ROEDERER, Juan. The Physics and Psychoacoustics of Music. p. 32.

En la figura 3, se muestra una gráfica posición (en mm) en la membrana basilar versus frecuencia. Se observa que casi dos tercios de la membrana perciben un rango de frecuencias de hasta 4000 Hz; y el tercio restante, la gran porción de frecuencias restantes entre 4000 y 16,000 Hz. Las líneas discontinuas en la frecuencia parten de $A_3 = 220$ Hz y se van duplicando para

A₄, A₅, etc. Como consecuencia, en la región de la membrana basilar la duplicación de frecuencia representa un desplazamiento constante sobre la sección de la membrana que percibe la frecuencia (eje vertical). Una relación como la anterior se describe como logarítmica.

La percepción que tiene el oído humano respecto a pequeñas variaciones de una frecuencia dada depende de la frecuencia. Por ejemplo para un tono de 2000 Hz, la detección de algún cambio se da a partir de una diferencia de al menos 10 Hz, eso es un 0.5%. Pero para un tono de 100 Hz, la detección empieza ante una variación de al menos 3 Hz, que es un 3%. De lo anterior se hace la importante conclusión que la sensibilidad del oído a cambios en frecuencia es mayor a bajas frecuencias.

1.3. Propiedades del sonido

Existen 6 propiedades o atributos que pueden describir lo que un ser humano experimenta al escuchar un sonido.

1.3.1. Tono o frecuencia

Se refiere a la rapidez de ocurrencia de las vibraciones que componen un tono. Cuando la frecuencia aumenta, también lo hace el tono.

1.3.2. Sonoridad

Indica cuan fuerte o suave se escucha un sonido, y se refiere a la amplitud de la onda vibratoria. La cantidad de compresión que sucede en las moléculas de aire, cuando el sonido viaja a través de ellas, no implica la rapidez a la que se desplazan, sino cuanta energía está almacenada en ellas.

1.3.3. Timbre

Se refiere a la calidad del sonido. Tanto como los instrumentos musicales y la voz humana producen sonidos que son ricos en vibraciones de diferente frecuencia y, que son percibidos al mismo tiempo. La combinación de todas esas vibraciones, con diferentes amplitudes también, es lo que se percibe como timbre.

Una forma sencilla de comprender este concepto es imaginar una flauta y la voz de una persona emitiendo un tono de la misma frecuencia. Fácilmente puede notarse la diferencia entre ambos sonidos. Colectivamente, el cerebro escucha lo anterior como un cambio en el color del sonido.

El timbre es uno de los atributos del sonido más interesantes y complejos de comprender. Pero es en el timbre en donde radica la naturaleza del diseño digital del sonido, pues tiene una gran facilidad para cambiar el color y el timbre del sonido rápidamente. Para hacer lo anterior en el mundo acústico, se tendría que cambiar algo del instrumento para cambiar el timbre.

Gracias al diseño digital del sonido, la mayor parte de la música que actualmente escuchamos ha pasado por un proceso digital de refinación. Lo que la electrónica puede hacer, que es tan impresionante, es cambiar fácilmente los timbres sólo manipulando ciertos parámetros.

1.3.4. Percepción de duración

La duración no es un elemento fijo, sino algo que se percibe. Un ser humano puede escuchar un sonido, proveniente de cualquier lado, que dura unas pocas milésimas de segundo, o bien, varios minutos. Cuando se habla de

lo que se está experimentando, cualquiera puede decir que percibió un tiempo lento o un tiempo rápido. Si se escucha una canción, ¿cómo se determina si la canción tiene un ritmo lento o rápido? Para ello, existe un punto estándar relativo, como referencia del tiempo, basado en los latidos del corazón.

Los latidos del corazón rondan entre los 60, 70, y a veces hasta 80 latidos por minuto si se es nervioso. Un sonido se percibirá como de tiempo rápido si va más rápido que los latidos; y de tiempo lento, si va más lento. Así que cuando se habla de tiempo rápido y de tiempo lento, el reloj interno del cuerpo es el encargado de proveer la información.

1.3.5. Envoltente o articulación

Muestra la forma del sonido en el dominio del tiempo basada en la forma en que se interpreta un instrumento musical, incluyendo a la voz humana. La articulación se refiere a lo que sucede en los primeros milisegundos de un sonido, y a la cantidad de energía que se aplica a la nota. Por ejemplo, con un violín se puede aplicar una gran cantidad de energía al tocar una nota, si se ejerce una presión inicial mayor con el arco sobre la cuerda. Luego, se libera la mayor parte de la presión haciendo que el sonido se estabilice hasta que suavemente desaparece.

Con un piano, la articulación es diferente, pues inicialmente se escucha un martillazo, y luego, la nota que suavemente desaparece. Así, el piano tiene una articulación percusiva, que gráficamente, representa un impulso inmediato. La envoltente es importante para el diseño digital del sonido. Pues conociendo las envoltentes de cada instrumento, se pueden imitar los mismos. Y entonces, por medio de una computadora, se puede tener todos los instrumentos musicales.

1.3.6. Difusión

Se refiere a capacidad del cerebro para localizar espacialmente la fuente de un sonido. El cerebro tiene la capacidad de procesar simultáneamente múltiples sonidos de diferentes fuentes y, ubicar espacialmente los mismos consciente o inconscientemente. Por ejemplo, si se está en la calle platicando con un amigo, uno le pone mayor atención a la conversación. Cuando se llega a una intersección, inconscientemente se procesan sonidos de ciertos automóviles provenientes de ciertas direcciones. Y en ése momento, se está teniendo la conversación, se están ubicando las fuentes de sonido de los carros, y se está determinando si los mismos se están acercando o alejando.

La difusión es un atributo importante en el diseño digital del sonido, por ejemplo, cuando se está escuchando una película en el cine. La experiencia auditiva resulta ser más real en el cine por que el sonido proviene de diferentes fuentes. Esto hace que una persona sienta que forma parte de la acción, y que sienta que forma de la película. Aquí, el sonido es representado por una configuración de canales (2.1, 5.1, 7.1). Una configuración 5.1 implica la existencia de 5 fuentes de sonido; y una de 2.1, sólo 2 fuentes. Ésta última configuración es mejor conocida como sonido estéreo.

1.4. Teoría musical

Existen muchas formas de definir la música, pero se puede decir que es el arte de ordenar los sonidos con el fin de crear una determinada emoción en el oyente. Los sonidos musicales se representan por una serie de símbolos y nomenclatura llamados notas musicales. Las notas que forman el sistema musical occidental se representan con las palabras o notas: Do, Re, Mi, Fa, Sol, La, Si.

En los países de habla inglesa, se emplean letras del alfabeto: C, D, E, F, G, A, B. La C corresponde al Do; la D, al Re y así sucesivamente.

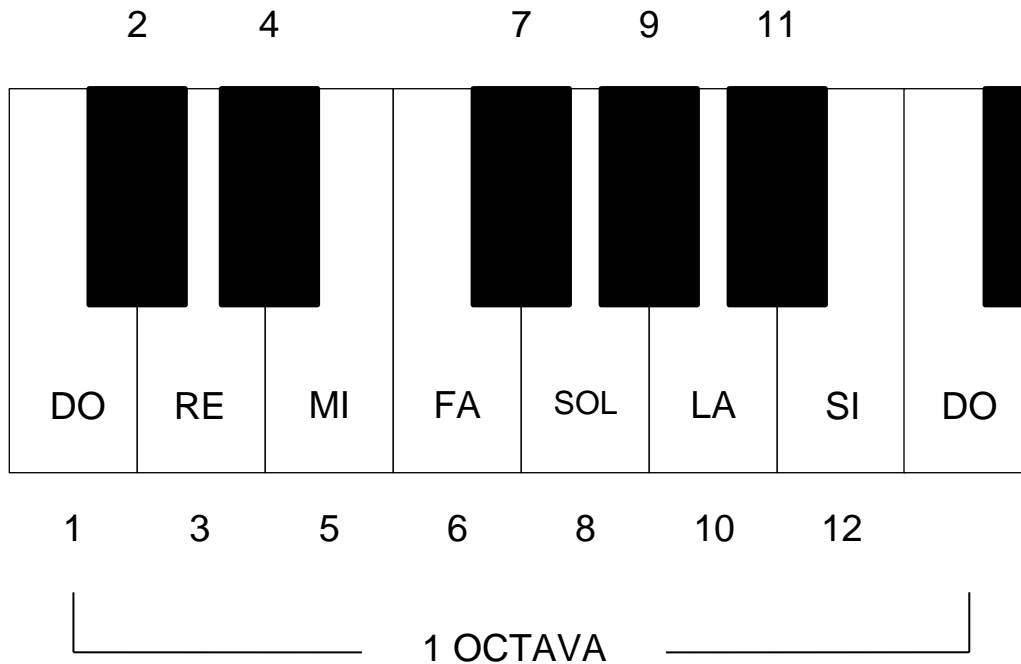
1.4.1. Tonalidad

La tonalidad se define a un conjunto de sonidos, cuyo funcionamiento está regido por un sonido principal llamado tónica. La tonalidad se basa en siete sonidos llamados grados y que se corresponden con los siete nombres de las notas.

Para definir la tonalidad de cada nota, desde las más bajas a las más altas, el sistema de nombres se repite. Después de cualquier Si viene otro Do. La distancia entre una nota y la siguiente del mismo nombre (por arriba o por abajo) se llama octava. Dos notas separadas por una octava suenan igual pero tienen diferentes tonalidades; una es más alta que la otra. Éste es un fenómeno natural, basado en que ambas notas están en una proporción de 2:1.

La mejor referencia visual del sistema musical occidental se puede encontrar en el teclado del piano, (ver figura 4). Las siete notas antes descritas están representadas por las teclas blancas. Sin embargo, en el intervalo de las teclas blancas también hay cinco teclas negras. Se nombran en relación con la nota blanca más próxima. Así, la nota de la tecla negra situada entre Do y Re se llama Do sostenido (Do alto) o Re bemol (Re bajo).

Figura 4. **Una octava en el teclado del piano**



Fuente: elaboración propia.

Estas notas que pueden recibir dos nombres se llaman enarmónicas y el contexto en que se usan es lo que determina cual nombre es el apropiado. Para indicar que una nota es sostenida se utiliza el símbolo numeral #; y para cuando es bemol, la letra b minúscula.

1.4.2. Escala cromática

Una escala es una serie consecutiva de notas que forman una progresión entre una nota y su octava. La escala puede ir hacia arriba o hacia abajo, subiendo o bajando una octava. Cualquier escala se puede distinguir de las

demás por su diseño de escalones o grados, es decir, por el modo en que las notas dividen la distancia representado por la octava.

El intervalo entre la nota de una tecla blanca y la de la tecla negra siguiente es un semitono. Dos semitonos son igual a un tono. Si se observa el teclado, se verá que entre el Si y el Do y entre el Mi y el Fa no hay tecla negra. Esto se debe a que la octava de siete notas no está realmente dividida en intervalos iguales. Del Si al Do y del Mi al Fa hay semitonos, no tonos enteros.

Si se cuentan ascendentemente los semitonos desde el Do hasta el próximo Do se contabilizarán 12 semitonos iguales en una octava, de donde se construye la escala cromática que forma la base de la música occidental.

Para hacer que todos semitonos sean iguales se tiene una única solución: la distancia musical entre cada una de las notas vecinas debe ser igual a la raíz doceava de 2, o sea, $2^{1/12}$. El uso de la base dos se debe a la existente proporción 2:1, antes mencionada, entre dos notas del mismo nombre pero con una octava de separación. Con lo anterior, se puede calcular la frecuencia de cada nota en la escala cromática dado el número de semitonos que la separan de la nota La en la tercera octava. Para ello, se utiliza la siguiente ecuación:

$$f(o, i) = 440 * 2^{\left(o + \frac{n}{12}\right)}$$

Donde n es el número de semitonos de separación; n toma un valor negativo cuando la nota está por debajo. Si se observa en la ecuación, cada doce semitonos se obtiene un entero, que indica que la nota La está en otra octava, superior o inferior. La variable o indica la octava buscada, para que el número de semitonos de separación sea más fácil de contar.

Es posible que la última fórmula no se pueda codificar si no se dispone de una función que permita aplicar potencias de cualquier exponente. No obstante, todos los lenguajes de programación disponen de al menos una función para hallar logaritmos y potencias de base exponencial.

Teniendo en cuenta lo anterior, y aplicando leyes de logaritmos, la ecuación se puede reescribir de la siguiente forma:

$$f(o, n) = 440 * e^{\left(\left(o - 3 + \frac{n-10}{12}\right) * \ln 2\right)}$$

Donde la variable n tiene ahora un significado más sencillo, pues toma un valor numérico entero positivo de acuerdo a la tabla I, según la nota de interés. En la tabla I, se han calculado las frecuencias de las notas musicales para la primera octava ($o = 1$), usando la última fórmula presentada.

Tabla I. **Frecuencia base de las notas musicales**

No.	Nota	Frecuencia (Hz)
1	Do	65.406
2	Do#	69.296
3	Re	73.416
4	Re#	77.782
5	Mi	82.407
6	Fa	87.307
7	Fa#	92.499
8	Sol	97.999
9	Sol#	103.826
10	La	110.000
11	La#	116.514
12	Si	123.471

Fuente: elaboración propia.

2. COMPONENTES DEL SISTEMA

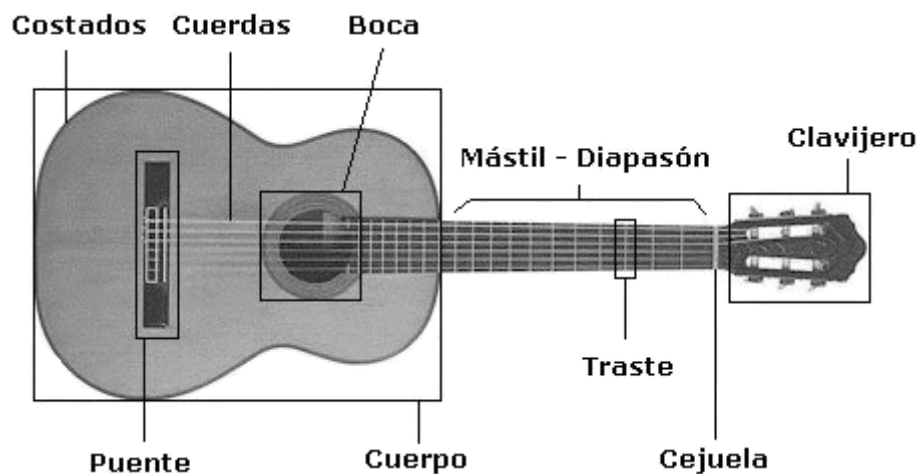
2.1. Guitarra acústica

Es un tipo de guitarra, cuyo sonido se genera mediante la vibración de las cuerdas que se amplifican en una caja acústica. Las modernas guitarras acústicas son de dos tipos: con cuerdas de nilón y con cuerdas de acero.

2.1.1. Estructura

A continuación se describirán las partes más generales de la estructura física de una guitarra acústica típica.

Figura 5. Partes físicas de una guitarra acústica típica



Fuente: Música y guitarras. www.musicayguitarras.com.mx/blog/tag/partes-de-la-guitarra/.

Consulta: septiembre de 2012.

- **Cuerdas:** la guitarra consta de seis cuerdas que toman su nombre según el sonido que producen cuando se tocan al aire (sueltas) y se enumeran de abajo hacia arriba, tomando como referencia la posición normal en que se toma la guitarra para tocar. La cuerda más delgada es la número 1 y la más gruesa es la número 6.
- **Clavijero:** su función es tensar y sostener las cuerdas, para ello consta de un mecanismo compuesto por tornillos sin fin que hacen girar un eje donde van enrolladas las cuerdas, estos ejes poseen un agujero central por el que se introduce la cuerda. La parte frontal es de madera laminada.
- **Cejuela:** es una pieza de forma alargada que va incrustada en la parte superior del diapasón, entre éste y el clavijero, (ver figura 5). Normalmente es de hueso o materiales sintéticos duros. La cejuela controla la altura de las cuerdas, fijándolas gracias a unas ranuras que lleva en su parte frontal. Tiene un efecto definitivo en el tono, aunque parezca insignificante.
- **Mástil – Diapasón:** es una pieza de ébano alargada de forma aplanada que cubre el mástil, éste tiene una o dos ranuras en las que encajan en la caja y es de madera dura de arce, por la parte frontal. Está dividido en espacios delimitados por unas barras de metal incrustadas llamadas trastes, generalmente a éstos espacios se le llama igual. Cada espacio (o traste) representa una nota musical. Tradicionalmente se fabrica de ébano, pero actualmente se utilizan también el palo de rosa y otras maderas duras y de color oscuro.
- **Cuerpo:** también llamado caja de resonancia. Es la parte principal y fundamental de las guitarras acústicas. Es el encargado de amplificar los

sonidos que se producen al hacer vibrar las cuerdas. Consta de tapa, costados o aros, y fondo. Estas piezas de madera están unidas con listones, y las juntas están rematadas con bordes decorativos.

- **Puente:** es una pieza alargada y estrecha situada sobre la tapa superior de la caja de resonancia a cierta distancia de la boca. En el puente se fijan las cuerdas antes de colocarlas y tensarlas en el clavijero. Para graduar la altura de las cuerdas se debe ajustar la selleta, que está en la parte superior del puente. El puente transmite eficazmente las vibraciones de las cuerdas a la caja; el mejor material para puentes (fijos) es la madera de ébano. Su gran densidad facilita la adhesión y la transferencia de vibraciones.
- **Golpeador:** protege el acabado de la guitarra y está colocado en la parte media baja de la guitarra (suele ser de concha de tortuga sintética). El golpeador es un compromiso, pues idealmente la tapa de la caja debería ser lo más flexible posible y debe poder vibrar libremente. Por eso, son placas finas fabricadas de un material que no inhibe el sonido del instrumento.

2.1.2. Funcionamiento

Cuando las cuerdas vibran desplazan pequeñas cantidades de aire, de modo que el sonido necesita ser amplificado para poder ser oído. Esto se consigue mediante la tapa armónica y la caja de resonancia.

La vibración de las cuerdas se transmite a través del puente a la tapa armónica que, gracias a sus dimensiones, desplaza una cantidad mayor de aire produciendo un sonido mucho mayor. Al vibrar la tapa armónica, las ondas de

sonido se producen tanto desde dicha tapa como desde el fondo de la caja de resonancia.

Una parte del sonido es proyectado a través del agujero de la tapa armónica. Este sonido se mezcla con el sonido producido por la parte frontal de la tapa armónica. El sonido resultante es una compleja mezcla de armónicos que da a cada guitarra su sonido distintivo.

En realidad no existe amplificación durante el proceso, en el sentido de que no se aporta energía externa para incrementar la intensidad del sonido (como en el caso de un amplificador eléctrico). Toda la energía procede de la pulsación de la cuerda. La función de todo el sistema es maximizar la intensidad del sonido pero, debido al principio de conservación de la energía, el precio energético se paga durante la vibración. Esto quiere decir que en una guitarra sin caja de resonancia, las cuerdas producirían apenas sonido, pero este duraría mucho más.

2.1.3. Cavidad de Helmholtz

El aire que entra en el cuerpo de un guitarra actúa casi como un resonador Helmholtz. El resonador de Helmholtz es un absorbente acústico creado artificialmente para absorber un estrecho margen de frecuencias. Los resonadores se basan en un artefacto acústico conocido como cavidad de Helmholtz; consiste en un orificio en el extremo de un cuello (como una botella) en cuyo interior el aire se comporta como una masa resonante.

Cuando se sopla correctamente dentro de una botella para producir un silbido, por ejemplo, la vibración aquí se debe a la elasticidad del aire. Cuando se comprime y aumenta su presión, el aire tiende a expandirse de nuevo a su

volumen original. La corriente de aire que proviene de nuestra boca obliga a la masa de aire interna a hundirse más abajo del cuello, lo que comprime el aire en su interior. La presión conduce el aire comprimido de vuelta hacia afuera de modo que la masa de aire se comporta como un resorte. El chorro de aire es capaz de moverse alternativamente en la botella y proporcionar la energía para mantener la oscilación.

2.1.4. Frecuencias abiertas

En la tabla II, se presentan los valores de frecuencia (en Hz) correspondientes a las cuerdas de una guitarra acústica típica pulsadas al aire.

Tabla II. **Frecuencias abiertas**

Primera	Segunda	Tercera	Cuarta	Quinta	Sexta
Mi (E)	Si (B)	Sol (G)	Re (D)	La (A)	Mi (E)
329.63	246.94	196.00	146.83	110.00	82.41

Fuente: elaboración propia.

2.1.5. Afinación

La afinación de concierto establece que la nota La (tocada por encima del Do central del piano, o en el quinto traste de la primera cuerda de la guitarra) debe tener una frecuencia de 440 Hz. El La del segundo traste de la tercera cuerda vibra a 220 Hz; y el de la quinta cuerda pulsada al aire, a 110 Hz.

Es recomendable afinar la nota deseada, en la guitarra, en el tono de concierto. Resulta vital para mantener la armonía musical cuando se toca en grupo, en el que intervienen otros instrumentos. De otra manera, toda la

melodía se oiría desafinada aunque los demás instrumentos estuviesen correctamente afinados.

Para afinar la guitarra se puede usar como referencia un piano: la primera cuerda pulsada al aire debe dar un Mi igual al Mi que hay dos notas por encima del Do central del piano. Hay que tener presente que la música para guitarra se escribe una octava más alta que la música para piano. Por lo tanto, el Do central de la guitarra (tercer traste de la quinta cuerda) es una octava más bajo que el Do central del piano.

También se puede afinar utilizando pitos de afinación o un diapasón. La mayoría de diapasones dan un La de 440 Hz. Aparte de obtenerse en el quinto traste de la primera cuerda, la nota La de 440 Hz se obtiene también en el décimo traste de la segunda cuerda y en el décimo cuarto traste de la tercera cuerda. Se afinan estas cuerdas, y luego las demás en relación con ellas. El La del diapasón corresponde también al quinto armónico de la quinta cuerda al aire, es decir, el La armónico dos octavas más alto que el La al aire.

La técnica de afinación puede resultar difícil para principiantes, pues depende de la capacidad del oído para percibir ligeras diferencias de tono entre dos notas separadas y reconocer la buena entonación cuando se oye. La habilidad se va desarrollando y mejora con la práctica.

Las clavijas siempre deben usarse para afinar la nota apretando. Nunca se debe afinar aflojando. Resulta mejor aflojar bastante la cuerda y luego ir apretando hasta afinar, así la cuerda se mantendrá estable. Se corre peligro de desafinación si se traslada la guitarra de un lugar frío a otro caliente, o viceversa.

A la afinación en la que la guitarra se afina consigo misma se denomina afinación relativa. Si se quiere afinar en tono de concierto será necesario tener al menos un tono de referencia para afinar una cuerda. Generalmente es buena idea tratar de afinar cada una de las seis cuerdas en el tono natural correcto. Luego se repasan y se hacen los ajustes necesarios para asegurarse de que cada cuerda esté afinada con las demás. La afinación se debe considerar en dos etapas: primero, una afinación general aproximada, y luego una afinación concreta mucho más precisa.

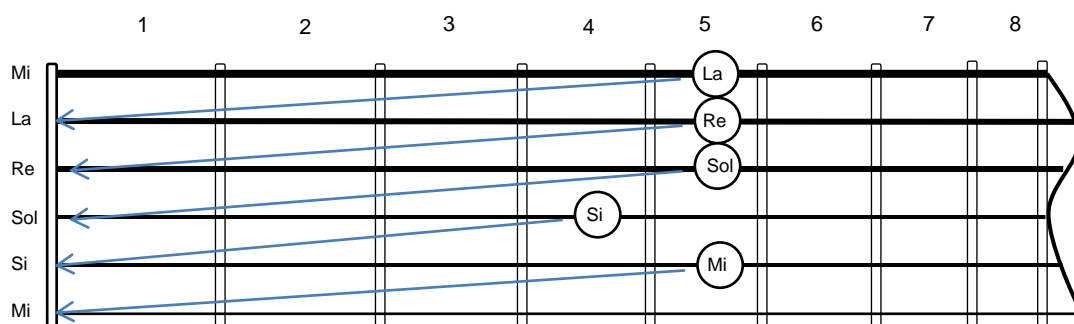
Unas últimas recomendaciones al afinar es que los dedos deben estar arqueados de manera que la punta toque el trastero perpendicularmente. Esto quiere decir que las uñas no deben sobresalir. Si son muy largas impedirán pisar correctamente las cuerdas o rozarán accidentalmente las demás. Cuando se pisa una cuerda hay que sujetarla entre dos trastes, inmediatamente por detrás del deseado. La longitud de la cuerda quedará así reducida a la distancia del traste a la selleta.

Se describen a continuación tres métodos de afinación. Para un mayor entender las referencias a la primera y sexta cuerda corresponden a la cuerda más delgada y más gruesa, respectivamente. En las figuras que acompañan la descripción de cada método se acentúa el grosor de la sexta cuerda y se incluye la nota de la cuerda al aire, además de los trastes numerados. Al observar las figuras se deben ver como si se estuviera sentado con una guitarra, para derechos, frente a un espejo. De esa manera, las figuras parecerán un reflejo de la guitarra misma.

2.1.5.1. Método de afinación 1

Este es el método más conocido y utilizado por los guitarristas principiantes e intermedios por su simplicidad y facilidad de memorización.

Figura 6. Método de afinación 1



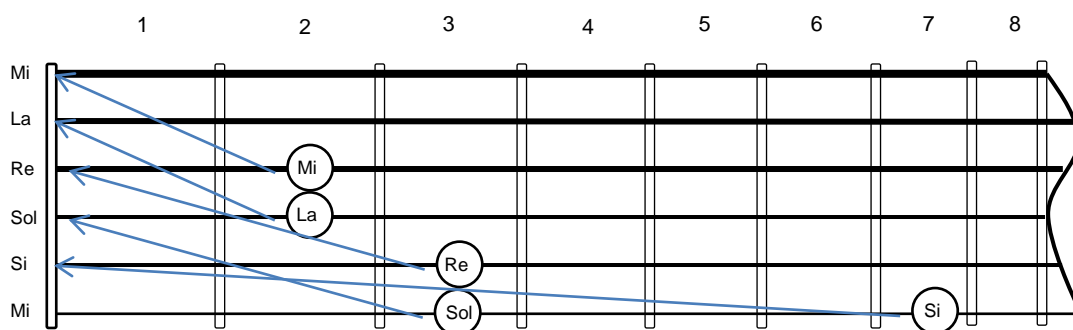
1. Afinar la primera cuerda (*Mi*) al aire, luego afinar la sexta, que debe dar al aire la misma nota pero dos octavas más baja.
2. Interpretar un *La* en el quinto traste de la sexta cuerda y afinar el *La* al aire de la quinta cuerda.
3. Interpretar un *Re* en el quinto traste de la quinta cuerda y afinar el *Re* al aire de la cuarta cuerda.
4. Interpretar un *Sol* en el quinto traste de la cuarta cuerda y afinar el *Sol* al aire de la tercera cuerda.
5. Interpretar un *Si* en el cuarto traste de la tercera cuerda y afinar el *Si* al aire de la segunda cuerda.
6. Finalmente, afinar un *Mi* en el quinto traste de la segunda cuerda y se comprueba con él el *Mi* de la primera cuerda al aire. No se debe pasar a la siguiente cuerda hasta tener la seguridad de haber afinado bien la anterior.

Fuente: elaboración propia.

2.1.5.2. Método de afinación 2

En el segundo método se hace mayor uso de las enarmónicas, por lo que es un método poco usado pues requiere tener un oído bien adiestrado.

Figura 7. Método de afinación 2



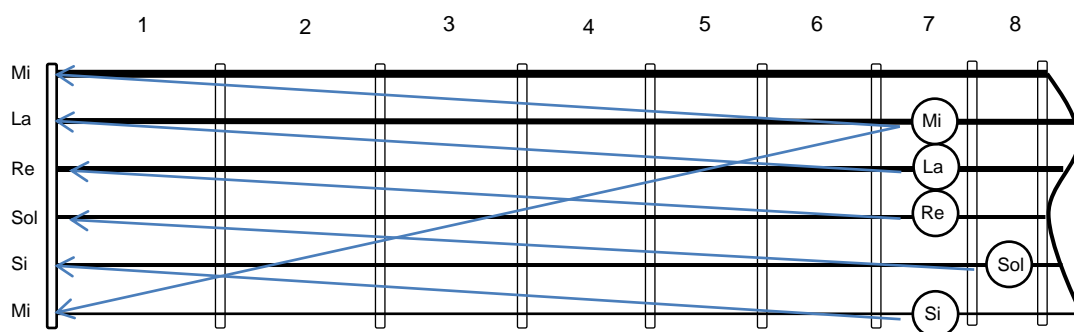
1. Afinar la primera cuerda al aire (*Mi*), e interpretar un *Si* en el séptimo traste. Con él afinar el *Si* al aire de la segunda cuerda.
2. Interpretar un *Sol* en el tercer traste de la primera cuerda y con él afinar el *Sol* al aire de la tercera cuerda.
3. Interpretar un *Re* en el tercer traste de la segunda cuerda y con él afinar el *Re* al aire de la cuarta cuerda.
4. Interpretar un *La* en el segundo traste de la tercera cuerda y afinar el *La* al aire de la quinta cuerda.
5. Interpretar un *Mi* en el segundo traste de la cuarta cuerda y afinar el *Mi* al aire de la sexta cuerda.
6. Comprobar el *Mi* de la primera y sexta cuerdas.

Fuente: elaboración propia.

2.1.5.3. Método de afinación 3

Así como en el segundo método, en el tercer método se basa en el uso de enarmónicas para conseguir la afinación típica.

Figura 8. Método de afinación 3



1. Si se dispone de un diapasón, afinar primero la quinta cuerda (*La* al aire).
2. Interpretar un *Mi* en el séptimo traste de la quinta cuerda y afinar con él el *Mi* de la primera y la sexta cuerda al aire.
3. Interpretar un *Si* en el séptimo traste de la primera cuerda y afinar con él el *Si* de la segunda cuerda al aire.
4. Interpretar un *Sol* en el octavo traste de la segunda cuerda y afinar con él el *Sol* de la tercera cuerda al aire.
5. Interpretar un *Re* en el séptimo traste de la tercera cuerda y afinar con él el *Re* de la cuarta cuerda al aire.
6. Interpretar un *La* en el séptimo traste de la cuarta cuerda y comparar con el *La* original de la quinta cuerda al aire.

Fuente: elaboración propia.

2.2. Micrófonos de audio

El trabajo de un micrófono es el de tratar de capturar lo más fiel posible el sonido de un instrumento. Pero también se puede utilizar para que caracterice el sonido final en una presentación. Así también, un preamplificador puede ser usado para representar un sonido con mayor precisión o darle textura y dimensión. Los micrófonos de audio son sencillamente aquellos tipos de micrófonos que tienen características que permiten captar con fidelidad distintos rangos de frecuencia, audibles para el oído humano, además de permitir darle algún tipo de efecto.

2.2.1. Clasificación de los micrófonos de audio

Se clasifican de acuerdo al patrón de recepción, el cual, depende de su construcción; y el método en el que adquieren el sonido (transductor).

2.2.1.1. Clasificación por patrones de polaridad

Representan la manera en que un micrófono recoge el sonido de acuerdo a la orientación que se le dé. Los patrones existentes son: omnidireccional, direccional y bidireccional.

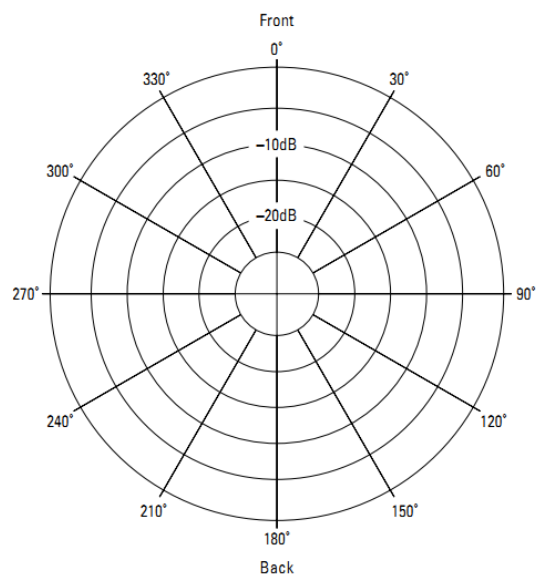
Los patrones de polaridad de los micrófonos están representados en un gráfico que generalmente viene con el micrófono (parte de su hoja de datos). Este gráfico es mejor conocido como gráfico polar, y muestra cuán bien un micrófono captura el sonido que tiene enfrente o por detrás de acuerdo a varias frecuencias, prácticamente es su representación de respuesta en frecuencia.

2.2.1.1.1. Omnidireccionales

El micrófono omnidireccional puede capturar sonidos que vienen de cualquier lado alrededor de él. Son útiles para ocasiones en las que se desea capturar no solamente la fuente de sonido sino también el sonido que le acompaña, el del cuarto de donde proviene la fuente de sonido, por ejemplo. Se pueden encontrar micrófonos omnidireccionales en estéreos para baterías y en grupos de instrumentos acústicos, tales como orquestas.

Los micrófonos omnidireccionales no son generalmente usados para grabaciones cercanas (donde se coloca el micrófono a menos de un pie de la fuente de sonido) porque tienden a capturar demasiado ruido del entorno, (ver figura 9).

Figura 9. Patrón omnidireccional



Fuente: STRONG, Jeff. Home recording for musicians for dummies. p. 120.

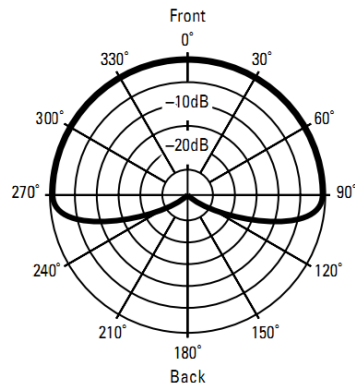
2.2.1.1.2. Direccionales

Los micrófonos direccionales capturan el sonido que tienen enfrente y rechazan el sonido que viene por detrás. Son el tipo más usado para presentaciones de bandas en vivo dado que se puede controlar el sonido que capturan eficientemente. Si se coloca un micrófono direccional en el tom-tom de una batería, el micrófono solamente capturaré el sonido del tambor y no el sonido proveniente de los demás instrumentos que le rodean.

Los micrófonos direccionales producen más bajos cuando están cerca de la fuente de sonido. A esto se le llama efecto de proximidad. Esencialmente, mientras más cerca esté el micrófono de la fuente, es más el sonido de bajas frecuencias que puede capturar. Este efecto no se presenta en micrófonos omnidireccionales o Figura-8. Muchos micrófonos direccionales del tipo condensador tienen un botón que permite eliminar el sonido de baja frecuencia agregado que puede ocurrir cuando se tiene el micrófono muy cerca de la fuente. Existen 3 tipos comunes de micrófono direccional: cardioide, supercardioide, hipercardioide.

Cardioide: es un tipo de micrófono direccional que rechaza por completo el sonido que proviene por detrás además de capturar todo el sonido que le provenga de enfrente, (ver figura 10).

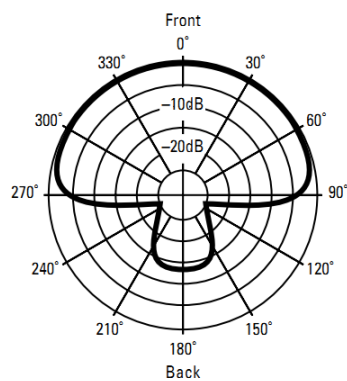
Figura 10. **Patrón cardioide**



Fuente: STRONG, Jeff. Home recording for musicians for dummies. p. 120.

Supercardioides: Tipo de micrófono direccional capaz de capturar una pequeña parte del sonido que proviene por detrás además de todo el sonido que le provenga de enfrente, (ver figura 11).

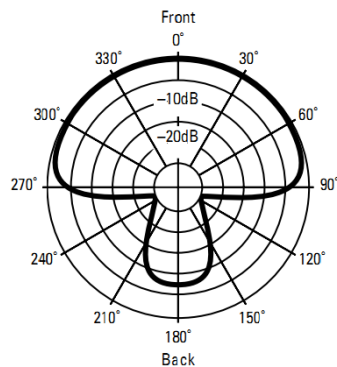
Figura 11. **Patrón supercardioide**



Fuente: STRONG, Jeff. Home recording for musicians for dummies. p. 120.

Hipercardioides: Tipo de micrófono direccional capaz de capturar una parte del sonido que le provenga exactamente por detrás además de todo el sonido que le provenga de enfrente, (ver figura 12).

Figura 12. **Patrón hipercardioides**



Fuente: STRONG, Jeff. Home recording for musicians for dummies. p. 120

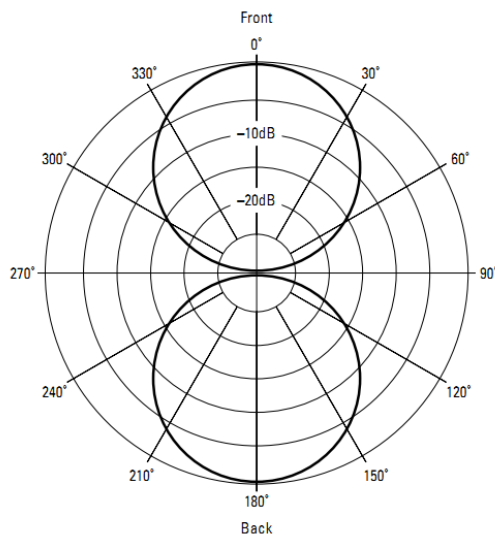
2.2.1.1.3. **Bidireccionales**

También llamados Figura-8, son micrófonos que capturan sonidos provenientes de enfrente y por detrás, pero no de los costados. Son generalmente usados para grabar dos instrumentos simultáneamente. Por ejemplo, se coloca el micrófono entre dos trompetistas con los costados perpendiculares a los intérpretes. Esto permite capturar el sonido de ambos instrumentos mientras se elimina cualquier sonido que provenga de frente a los músicos.

La mayoría de micrófonos Figura-8 tienen la misma respuesta en frecuencia para el frente y por detrás, pero algunos micrófonos del tipo *ribbon*

producen respuestas muy diferentes, dependiendo si el sonido proviene de enfrente o por detrás, (ver figura 13).

Figura 13. **Patrón bidireccional**



Fuente: STRONG, Jeff. Home recording for musicians for dummies. p. 121.

2.2.1.2. Clasificación por el tipo de transductor

El transductor es un dispositivo que transforma un tipo de energía en otro. El micrófono es un tipo de transductor que transforma energía acústica (sonido) en energía eléctrica (señal de audio). La fidelidad del mismo depende del método que utiliza para la conversión de energía.

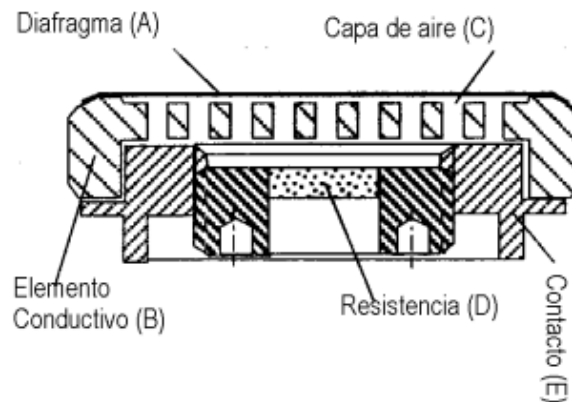
Los micrófonos de audio se clasifican en 3 tipos de acuerdo a la forma en que adquieren y transforman la energía acústica: condensador, dinámico, y *ribbon*.

2.2.1.2.1. Condensador

Está compuesto de un diafragma montado sobre una superficie conductiva, generalmente cerámica; separados por una delgada capa de aire que sirve de dieléctrico, y con la cual forman un condensador, (ver figura 14).

Cuando el diafragma vibra en respuesta a un sonido, se acerca y aleja de la superficie conductiva, la cual, es una fiel copia de la frecuencia de vibración.

Figura 14. **Estructura interna del micrófono de condensador**



Fuente. EMSIA. Curso intensivo de sonido. p. 2.

Los micrófonos de este tipo son capaces de producir una señal de salida baja, por lo que son de muy alta impedancia e incorporan un amplificador para manejarse en los niveles operativos del micrófono. Este amplificador tiene una doble función: aumentar el nivel de la señal y aislar el micrófono del ruido que podría producirse al conectar a una entrada de impedancia menor. Los micrófonos de condensador son más sensibles a condiciones ambientales (humedad, temperatura, etc.) que el modelo dinámico.

Los micrófonos de condensador se diseñan actualmente para alimentarlos desde la consola (alimentación *phantom*); el objetivo del amplificador es transformar la alta impedancia de salida del micrófono en baja impedancia, requerida en la entrada de canal de cualquier consola de mezcla. Este tipo de micrófono es sin duda el más preferido en los estudios de grabación debido a su gran sensibilidad y precisión, aunque vale la pena agregar que también son costosos. Se dividen en dos grandes categorías: de diafragma pequeño y de diafragma grande.

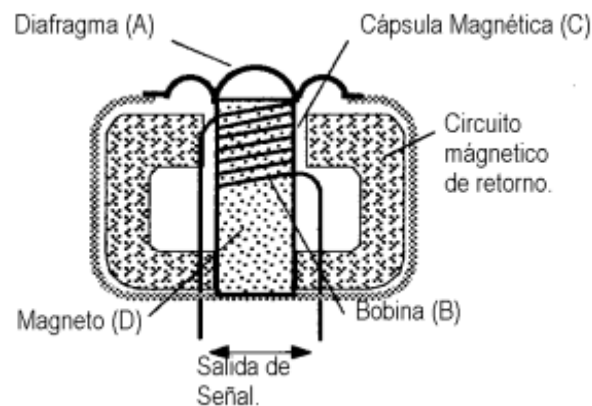
- Diafragma pequeño: los micrófonos de diafragma pequeño tienen una mejor respuesta en frecuencia y pueden capturar con precisión instrumentos musicales con altas componentes de frecuencia (violines, por ejemplo).
- Diafragma grande: los micrófonos de diafragma grande son más populares que su contraparte de diafragma pequeño, en parte debido a que los primeros tienen una base más pronunciada que le permite captar frecuencias más bajas. Lamentablemente poseen auto ruido, o sea, ruido creado por el micrófono.

Existe un tipo especial de micrófono de condensador capaz de retener la carga estática por tiempo indefinido. A este tipo de micrófonos se les denomina micrófonos Electret. El fabricante carga el diafragma al construirlo y no requiere de alimentación. Sin embargo, requieren de un amplificador que traen incorporado que opera con una batería de entre 1.5 a 9 voltios ubicada en el mismo cuerpo del micrófono.

2.2.1.2.2. Dinámicos

Está compuesto de un diafragma flexible unido a un conductor, quien a su vez es dirigido hacia un elemento magnético que queda libre para moverse dentro de una capa de aire, (ver figura 15).

Figura 15. Estructura interna del micrófono dinámico



Fuente. EMSIA. Curso intensivo de sonido. p. 1.

Cuando las ondas de sonido golpean el diafragma, el movimiento se refleja en la bobina la cual produce variaciones en las líneas de campo magnético que inducen una pequeña cantidad de corriente eléctrica en el cable. La frecuencia a la que oscila esta señal de corriente es una fiel réplica del movimiento oscilante del diafragma. Tienen una gran resistencia física y soportan fácilmente los cambios de temperatura, humedad, etc., por lo que son muy utilizados en espacios abiertos. Tienden a acentuar el centro del espectro de frecuencias debido a que la velocidad de respuesta del diafragma (relativamente hablando cuando se le compara con el micrófono de condensador) es más baja.

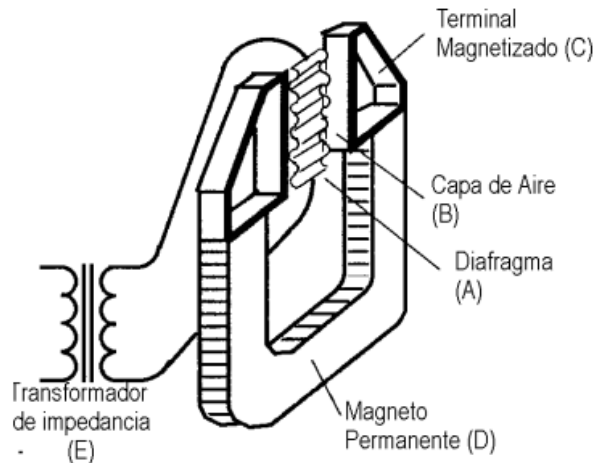
Los micrófonos dinámicos tienen características que los hacen únicos. Pueden manejar altos valores de SPL (Sound Pressure Level), que los hacen perfectos para señales extremadamente sonoras, tales como baterías, amplificadores, y voces de vocalistas de *rock*. Por otro lado no son tan transparentes (no representan con precisión altas frecuencias) como los micrófonos de condensador, por lo que a menudo imparten una pequeña distorsión al sonido, la cual, podría ser de beneficio si se le utiliza como efecto especial en la señal.

El sonido de un micrófono dinámico se puede describir como encajonado, esto significa que no representan ni las frecuencias más altas ni las frecuencias más bajas del espectro audible humano. Por otro lado tienen alta durabilidad respecto a los otros tipos, por lo que el trato agresivo seguramente no los dañará considerablemente, aparte del diafragma y un fuerte metal que lo protege.

2.2.1.2.3. *Ribbon*

El método para la señal de salida correspondiente a la del sonido es semejante a la de los del tipo dinámico. Están compuestos de un diafragma fino y corrugado ubicado en la capa de aire de un magneto muy potente. El diafragma se sostiene por sus extremos pero se mueve libremente dentro de su zona, (ver figura 16).

Figura 16. Estructura interna del micrófono *ribbon*



Fuente. EMSIA. Curso intensivo de sonido. p. 3.

Cuando el diafragma es sacudido por la onda sonora, vibra y corta las líneas de campo magnético induciendo voltaje en sí mismo. El voltaje es pequeño y la impedancia es baja; generalmente incorporan un transformador para elevar el nivel de señal y aislar la impedancia del micrófono de la de la consola a la que está conectado, por ejemplo.

Los primeros modelos usados eran demasiado frágiles y se dañaba muy fácilmente, pero los modelos disponibles hoy en día son mucho más robustos que los primeros. Se utilizan en estudios de grabación debido a sus características sonoras excelentes en general y a una suave respuesta a altas frecuencias.

2.3. Tarjeta de sonido

También conocida como tarjeta de audio, la tarjeta de sonido es una tarjeta de expansión interna para computadoras que facilita la entrada y salida de señales de audio de y hacia una computadora bajo control de algún software específico. Su uso típico incluye aportar la componente de audio de aplicaciones multimedia tales como composición musical, edición de video o audio, presentaciones, entretenimiento, y proyección de video.

Muchas usan un Conversor Digital Análogo (DAC), que convierte grabaciones o datos digitales generados en formato analógico. La salida es conectada a unas bocinas amplificadoras o a un dispositivo externo usando conexiones estándar, como un conector RCA, por ejemplo.

La mayoría de tarjetas de sonido tiene una entrada de línea para una señal que proviene de una fuente que tiene niveles de voltaje superiores a los de un micrófono. La tarjeta puede digitalizar estas señales así como también transferir las muestras a una memoria principal donde un software puede escribirlas al disco duro para su almacenaje, edición, o posterior edición. Otro conector externo común es la del micrófono, para señales provenientes de un micrófono o de dispositivos de entrada de baja señal.

2.4. Selección de componentes

En la diversidad de guitarras acústicas que se pueden encontrar en el mercado, una de las diferencias de mayor interés se encuentra en la calidad de sonido que obtienen del instrumento. Sin embargo, estas variaciones en el sonido no cambian la frecuencia fundamental a la que se afina cada cuerda, de modo que el uso de cualquier guitarra en buen estado será suficiente. Lo

recomendable es que las cuerdas que tenga puestas sean nuevas, pues es cuando están en óptimas condiciones sus características físicas de elasticidad, entorchado, etc.

En cuanto al micrófono, existen de modelos específicos para cada aplicación. Sin embargo, el objetivo principal en su elección es hacer funcionar el afinador con componentes sencillos, por no decir baratos. Para este estudio, se trabajó con un micrófono externo para computadora tipo Electret de bajo costo. La lógica es sencilla, si funciona con un micrófono de media calidad, entonces funcionará con un modelo que posea características superiores a la media.

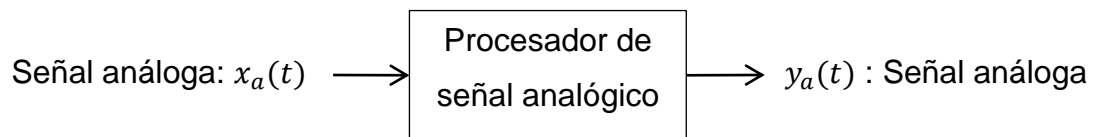
Con la tarjeta de sonido no hay elección compleja por hacer, se utilizará la tarjeta de sonido interna de una *netbook*. Bien se podría utilizar una tarjeta de sonido dedicada de una computadora de escritorio, pero la *netbook* servirá, además, para representar una computadora con recursos limitados.

3. PROCESAMIENTO DIGITAL

3.1. Procesamiento digital de señal

La mayoría de señales que se pueden encontrar en la práctica son señales analógicas, es decir, que varían continuamente en tiempo y amplitud. Estas señales pueden ser procesadas usando redes eléctricas que contienen elementos electrónicos activos y pasivos. A lo anterior se le conoce como procesamiento analógico de señal (ASP) y un diagrama representativo se puede observar en la figura 17.

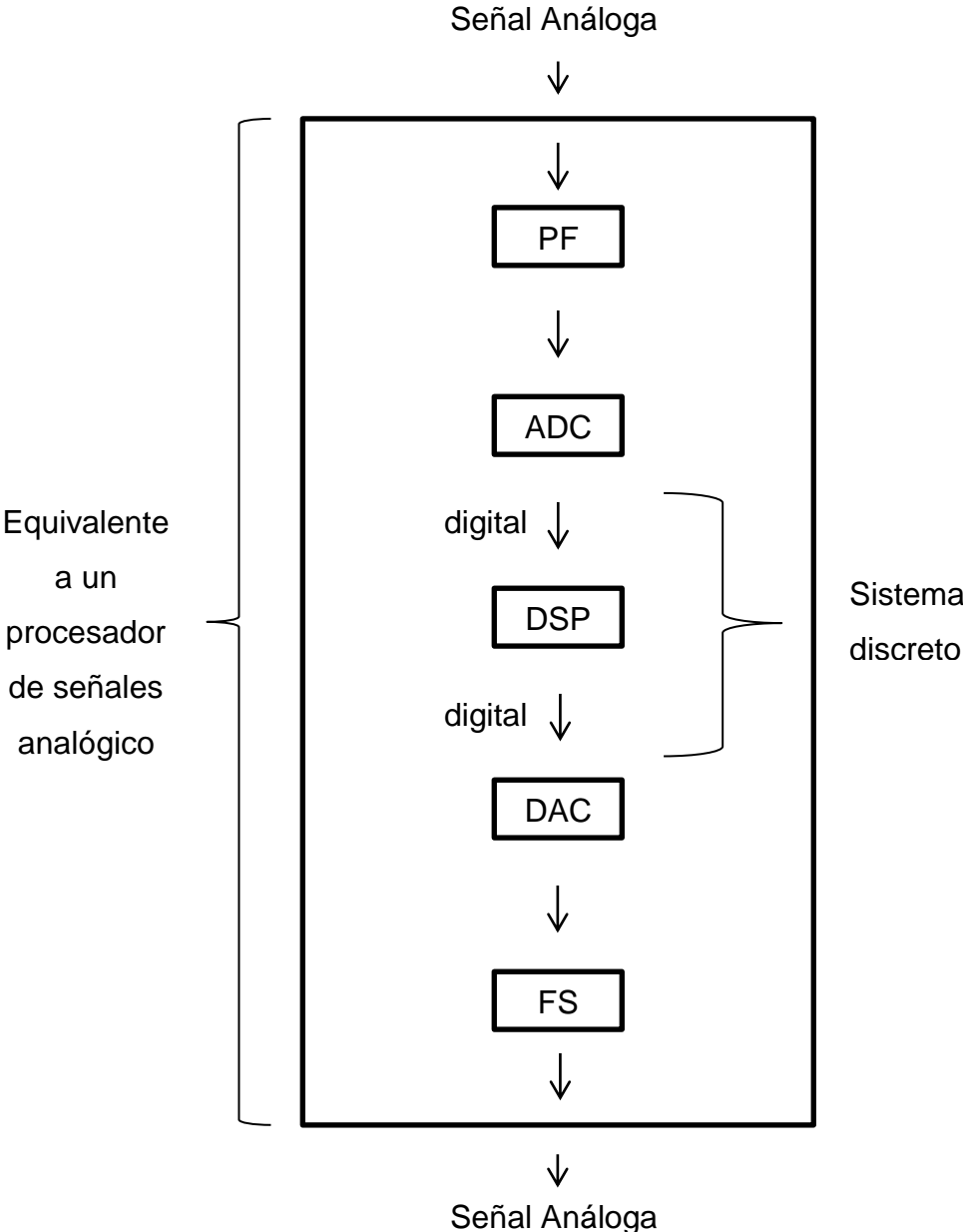
Figura 17. Diagrama de bloques de un procesador analógico



Fuente: elaboración propia.

Las señales analógicas también pueden ser procesadas usando componentes digitales que contiene sumadores, multiplicadores, elementos lógicos o microprocesadores de propósito especial. Sin embargo, para utilizar los elementos recién mencionados es necesario convertir primero las señales analógicas a otra forma compatible con el hardware digital. Para ello se toman muestras de la señal que adquieren un valor de una serie de valores finitos posibles que pueden ser representados por números binarios, o bits. El procesamiento de señales digitales se le abrevia como DSP. Su diagrama de bloques representativo se observa en la figura 18.

Figura 18. Diagrama de bloques de un procesador digital



Fuente: elaboración propia.

Donde:

PF: es un filtro previo utilizado para evitar el *aliasing*, que condiciona la señal analógica para evitar traslapes en el dominio de la frecuencia cuando sea procesada.

ADC: es un convertidor análogo-digital, que produce una serie de números binarios que describen la señal análoga.

DSP: es el cerebro de la etapa de procesamiento, y puede ser representado por una computadora o un procesador.

DAC: es la operación inversa del ADC, llamada convertidor digital-análogo, produce una forma de onda escalona de una secuencia de números binarios.

FS: es un filtro de salida que suaviza la señal escalona del DAC para convertirla finalmente en una señal análoga deseada.

La mayor desventaja de utilizar ASP es su limitada capacidad para llevar a cabo aplicaciones de procesamiento de señal complicadas, que para su implementación se requerirían productos muy caros. Por otro lado, usando DSP se puede convertir la computadora de uso personal en una poderosa herramienta de procesamiento digital. Las ventajas más importantes son:

- Los sistemas DSP se pueden implementar usando software en una computadora de propósito general. Incluso resulta más conveniente para el desarrollo y pruebas preliminares, además que el software es portable.
- Las operaciones de DSP están basadas en sumas y multiplicaciones, que brindan una gran estabilidad ante diversas condiciones, como la temperatura, por ejemplo.
- Las operaciones de DSP pueden ser modificadas en tiempo real, la mayoría de veces sólo con cambios en la programación, o la recarga de registros.

- Los sistemas DSP tienen un costo muy inferior en contraste con las tecnologías VLSI, lo que se reduce en costos de memorias, compuertas, microprocesadores, etc.

3.2. MATLAB

MATLAB es un sistema interactivo, basado en matrices, para la visualización y el desarrollo de algoritmos numéricos científicos y de ingeniería. Su fortaleza se debe a la capacidad que el programa tiene para resolver fácilmente problemas numéricos complejos y en una fracción del tiempo requerido por otros lenguajes de programación.

La interacción con MATLAB se hace a través de una ventana de comandos de su interfaz gráfica de usuario (GUI). Hay tres elementos básicos en MATLAB: números, variables, y operadores. Las marcas de puntuación tienen significados especiales.

El programa puede manejar con gran precisión todo tipo de números, ya sean reales o complejos. Todas las variables básicas representan matrices o arreglos, así que cuando se opera con una variable se operan todos sus elementos y esto es lo que lo hace una herramienta tan eficiente.

Las capacidades de MATLAB incluyen operaciones indexadas, control de flujo de comandos, gráficas en dos y tres dimensiones, desarrollo de funciones y aplicaciones mejor conocidas como *scripts*.

3.3. Señales en tiempo discreto

Una señal análoga es denotada como por $x_a(t)$, en donde la variable t puede representar cualquier cantidad física, pero en la mayoría de ocasiones representará al tiempo en segundos. Una señal discreta será denotada como $x(n)$, en donde la variable n es un valor entero y representa instantes discretos de tiempo y por tanto a estas señales se les denomina señales en tiempo discreto.

Una señal arbitraria $x(n)$ puede ser sintetizada como una suma de secuencias de muestreo unitarias retrasadas y escaladas.

$$x(n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k)\delta(n - k)$$

3.3.1. Sistemas discretos

Matemáticamente, un sistema de tiempo discreto es descrito como un operador $T[\cdot]$ que toma una secuencia de entrada $x(n)$ y la transforma en otra secuencia $y(n)$ denominada como de salida.

$$y(n) = T[x(n)]$$

En DSP los sistemas son clasificados en lineales y no lineales.

3.3.1.1. Sistemas lineales

Un sistema discreto $T[\cdot]$ es un operador lineal $L[\cdot]$ si y solo si $L[\cdot]$ satisface el principio de superposición.

$$L[a_1x_1(n) + a_2x_2(n)] = a_1L[x_1(n)] + a_2L[x_2(n)], \forall a_1, a_2, x_1(n), x_2(n)$$

Si se combina la fórmula del modelo de señal arbitraria como suma de secuencias con el operador lineal recién descrito, la salida $y(n)$ de un sistema lineal con una entrada arbitraria $x(n)$ está dada por

$$y(n) = L[x(n)] = L\left[\sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k)\delta(n-k)\right] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k)L[\delta(n-k)]$$

La respuesta $L[\delta(n-k)]$ puede ser interpretada como la respuesta de un sistema lineal en el tiempo n debido a una secuencia de muestreo unitaria en el tiempo t . La anterior respuesta es llamada respuesta al impulso y denotada por $h(n, k)$. La salida está dada por la sumatoria de superposición

$$y(n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k) h(n, k)$$

La implementación de la ecuación anterior requiere de la respuesta al impulso $h(n, k)$ variante en el tiempo, lo que no es conveniente. Es por eso que los sistemas de tiempo-invariante son ampliamente utilizados en DSP.

3.3.1.2. Sistemas lineales de tiempo invariante (LTI)

Un sistema lineal en el que el par entrada-salida, $x(n)$ y $y(n)$, es invariante a un desplazamiento k en el tiempo es llamado sistema lineal de tiempo-invariante.

$$y(n) = L[x(n)] \Rightarrow L[x(n-k)] = y(n-k)$$

Para un sistema LTI, el orden en que se ejecuta la operación lineal y la de desplazamiento es invariante.

$$\begin{aligned}
 x(n) &\rightarrow \boxed{L[\cdot]} \rightarrow y(n) \rightarrow \boxed{\text{Desplazamiento } k} \rightarrow y(n - k) \\
 x(n) &\rightarrow \boxed{\text{Desplazamiento } k} \rightarrow x(n - k) \rightarrow \boxed{L[\cdot]} \rightarrow y(n - k)
 \end{aligned}$$

3.4. Transformada discreta de Fourier (DFT)

Una señal discreta puede ser representada por una combinación lineal de señales básicas escaladas y retardadas. Cada señal base provee una nueva representación gráfica de la señal. Cada representación tiene diversas ventajas que dependen de la aplicación. Sin embargo si el sistema es lineal e invariante con el tiempo, existe solo una representación que sobresale en utilidad sobre las demás. Esta singular representación está basada en señales exponenciales complejas y es denominada como Transformada Discreta de Fourier.

Si $x(n)$ es absolutamente sumable, entonces su Transformada Discreta de Fourier está dada por

$$X(e^{j\omega}) \triangleq F[x(n)] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n) e^{-j\omega n}$$

La Transformada Discreta de Fourier inversa de $X(e^{j\omega})$ está dada por

$$x(n) \triangleq F^{-1}[X(e^{j\omega})] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} X(e^{j\omega}) e^{j\omega n} d\omega$$

El operador $F[\cdot]$ transforma una señal discreta $x(n)$ en una función compleja continua $X(e^{j\omega})$ de variable real ω , llamada frecuencia digital, y está medida en radianes/muestra.

3.4.1. Propiedades de la DFT en el tiempo

Se establecerán las siguientes dos propiedades sin pruebas.

- Periodicidad: la transformada de Fourier discreta en el tiempo $X(e^{j\omega})$ es periódica en ω con periodo 2π .

$$X(e^{j\omega}) = X(e^{j(\omega+2\pi)})$$

Esto implica que sólo se necesita un período de $X(e^{j\omega})$ para el análisis y no todo el dominio $-\infty < \omega < \infty$.

- Simetría: para valores reales de $x(n)$, $X(e^{j\omega})$ es simétrica con su conjugado.

$$X(e^{-j\omega}) = X^*(e^{j\omega})$$

o

$$\operatorname{Re}[X(e^{-j\omega})] = \operatorname{Re}[X(e^{j\omega})] \quad (\text{simetría par})$$

$$\operatorname{Im}[X(e^{-j\omega})] = -\operatorname{Im}[X(e^{j\omega})] \quad (\text{simetría impar})$$

$$|X(e^{-j\omega})| = |X(e^{j\omega})| \quad (\text{simetría par})$$

$$\angle X(e^{-j\omega}) = -\angle X(e^{j\omega}) \quad (\text{simetría impar})$$

Esto implica que para graficar $X(e^{j\omega})$ solo se necesita considerar la mitad de un período de $X(e^{j\omega})$.

Convolución: ésta es una de las propiedades más útiles que hacen que el análisis de sistemas en el dominio de la frecuencia sea más conveniente.

$$F[x_1(n) * x_2(n)] = F[x_1(n)]F[x_2(n)] = X_1(e^{j\omega})X_2(e^{j\omega})$$

3.4.2. Transformada rápida de Fourier (FFT)

La transformada discreta de Fourier es la única transformada que es discreta en el dominio del tiempo y frecuencia, y está definida para secuencias de duración finita. A pesar de que es una transformada capaz de ser implementada en una computadora, su eficiencia es muy baja, especialmente cuando la longitud de la secuencia N es larga. Sin embargo, existe un procedimiento que reduce sustancialmente el número de operaciones que requiere la DFT. El conjunto de estos algoritmos que hacen más eficiente el cálculo de la DFT se le conocen como algoritmos de transformada rápida de Fourier (FFT).

Considérese una secuencia $x(n)$ de N muestras. Su respectiva DFT está dada por:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)W_N^{nk}, \quad 0 \leq k \leq N - 1$$

Donde $W_N = e^{-j2\pi/N}$. Para obtener una muestra de $X(k)$, se necesitan N multiplicaciones complejas y $(N - 1)$ sumas complejas. De modo que para obtener todo el conjunto de coeficientes de la DFT, se necesitan N^2 multiplicaciones complejas y $N(N - 1) \cong N^2$ sumas complejas. Dado que también se tienen que almacenar N^2 coeficientes complejos, se ve claro que el

número de operaciones para una secuencia de N muestras depende cuadráticamente de N .

En un eficiente diseño de algoritmo, el número de operaciones debería ser constante por cada muestra tomada. Y el número total de operaciones debería ser lineal con respecto a N . La dependencia cuadrática en N puede ser reducida observando que la mayoría de operaciones puede ser eliminada usando la propiedad de periodicidad y simetría.

3.4.2.1. Algoritmo raíz-2

Cuando la longitud N de la DFT deseada puede ser expresada como el producto de enteros menores, entonces puede aplicarse un algoritmo que utiliza el concepto de decimación en el tiempo. Este algoritmo, tan eficiente, denominado raíz-2, divide la secuencia principal en secuencias más pequeñas, luego las transforma y las vuelve unir, y así se forma la transformada completa de la secuencia principal.

La secuencia principal se separa en dos secuencias: una contiene los índices pares $x_e \triangleq x(2n)$ de la secuencia principal; y la otra, los índices impares $x_o \triangleq x(2n + 1)$. De esa forma, la DFT de la secuencia de N muestras se puede calcular usando dos transformadas de longitud $N/2$. La separación del cálculo de la DFT en sumas sobre los índices pares e impares de la secuencia principal es lo que se conoce como decimación en el tiempo.

Si la longitud N es una potencia de 2, es decir, $N = 2^k$ donde $k > 1$ es un entero, entonces la decimación en el tiempo puede aplicarse $k - 1$ veces, hasta que cada DFT que se va a calcular tenga una longitud de 2. Esto se logra partiendo cada una de las subsecuencias de la secuencia principal en 2

subsecuencias más, y así sucesivamente. La ventaja de hacer lo anterior es que una DFT de longitud 2 no requiere multiplicaciones, lo que hace que su cálculo sea más rápido. Y a este procedimiento se le conoce como raíz-2.

Esa es la razón por la que a veces se fuerza una secuencia a tener una longitud que sea una potencia de 2. Su eficiencia es tal, que sólo se requieren $N \log_2 N$ multiplicaciones complejas.

3.4.3. Teorema de muestreo

Una señal análoga $x_a(t)$ con un ancho de banda de F_0 puede ser reconstruida a partir de sus muestras $x(n) = x_a(nT_s)$ si la frecuencia de muestreo $F_s = 1/T_s$ es mayor que el doble del ancho de banda F_0 de $x_a(t)$.

$$F_s > 2F_0$$

En caso contrario existirá *aliasing* en $x(n)$, o sea, habrá un traslape de espectros en el dominio de la frecuencia y se perderá información irremediablemente. La frecuencia de muestreo de $2F_0$ para una señal análoga de banda limitada es llamada frecuencia de Nyquist.

3.5. Filtros digitales

Son filtros que están contruidos por elementos simples, tales como sumadores, multiplicadores, registros de corrimiento, y elementos de retardo. Como resultado de los elementos anteriores, los filtros digitales son generalmente no afectados por factores como la precisión de componentes, la estabilidad de temperatura, manejo de gran cantidad de información, que afectan a circuitos análogos de filtrado. Asimismo, muchas de las restricciones

físicas de los dispositivos análogos pueden ser removidas o al menos pasar por encima de ellas en un procesador digital. Incluso el desarrollo de filtros de mayor orden pueden ser fácilmente implementados y modificados, simplemente cambiando el algoritmo de computación.

En una forma genérica, un filtro digital significa un sistema lineal de tiempo invariante designado para un trabajo específico de discriminación de frecuencia. Existen dos tipos de filtros digitales: FIR e IIR.

3.5.1. Filtros FIR

Si la respuesta al impulso unitario de un sistema LTI es de finita duración, entonces el sistema es llamado filtro de respuesta al impulso de duración-finita (o filtro FIR). Para un filtro FIR $h(n) = 0$ para $n < n_1$ y para $n > n_2$.

3.5.2. Filtros IIR

Si la respuesta al impulso de un sistema LTI es de duración infinita, entonces el sistema es llamado filtro de respuesta al impulso de duración-infinita (o filtro IIR). Un filtro IIR es un filtro recursivo en donde la salida $y(n)$ es recursivamente procesada de los valores procesados previamente. Se utilizan en aplicaciones en donde no es imprescindible disponer de una respuesta en frecuencia con fase lineal. Su principal ventaja radica en que, para cumplir unas especificaciones determinadas, precisan de un orden sensiblemente inferior al requerido por un filtro FIR.

4. CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA

4.1. Resumen técnico del afinador

Una vez que la cuerda emite un pulso mecánico, éste viaja a través del aire y es recibido por el micrófono quien lo convierte en un pulso eléctrico analógico, idéntico al emitido, que se mezcla con el ruido del medio. La señal llega a la tarjeta de sonido de la computadora quien lo convierte en una señal digital y lo muestrea de acuerdo a las especificaciones dadas por el software MATLAB y la señal final es almacenada en un vector dentro de la aplicación.

Dentro del programa, se verifica si la muestra de mayor potencia en el dominio del tiempo supera un umbral determinado experimentalmente. En caso que no se supere, entonces el vector es descartado y se vuelve a tomar una nueva muestra de la señal recibida por el micrófono, el procedimiento se repite hasta que la señal recibida supere dicho umbral.

Cuando se ha superado el umbral, el vector es normalizado en el dominio del tiempo antes de hacerle pasar por un filtro pasabajos, que funciona como anti *aliasing*. Luego, se aplica la FFT para pasar la señal al dominio de la frecuencia donde es nuevamente normalizado. El programa busca la ubicación de la componente de máxima potencia y la introduce a un directorio de búsqueda, el cual, indicará a que nota está más cercana la señal recibida y cuál es la desviación porcentual estimada correspondiente.

El afinador tiene dos modos de operación, el primero corresponde al modo de afinación libre, en donde la información que devuelve el directorio es presentada en la interfaz gráfica de forma útil para el usuario. En el apéndice I se puede apreciar con mayor detalle la interfaz gráfica y los modos de funcionamiento del afinador.

El segundo modo corresponde al modo de afinación típica, que como su nombre lo indica, su objetivo es afinar la guitarra de la forma más usual. Luego que el directorio devuelve la información, se verifica qué cuerda se está afinando en ese momento, según la interfaz gráfica.

La frecuencia se hace pasar por unas comparaciones para determinar si es más alta o más baja de lo necesario:

- Si la frecuencia es más alta, se indica al usuario a través de la interfaz gráfica que debe aflojar la clavija.
- Si es más baja, se indica al usuario que debe apretar la clavija.

El afinador no opera en tiempo real, pero actualiza la información cada segundo, pero eso es por el segundo que se usa para adquirir una muestra. Lo anterior significa que MATLAB no está ininterrumpidamente tomando muestras del medio y almacenándolas. Lo anterior requeriría un uso mayor de memoria y la idea es mejorar la eficiencia del afinador en condiciones no idóneas.

Por otro lado, el tiempo en que se procesa la señal una vez adquirida es prácticamente despreciable y hace que la actualización por segundo funcione bastante bien para la aplicación en la que se está implementando.

En el resto de secciones se describen con mayor detalle las características y procedimientos más importantes.

4.2. Rango de operación

El afinador opera en un rango de frecuencias que va de 64 a 508 Hz, que contiene a las primeras 3 octavas de la escala musical. Lo anterior satisface ampliamente el rango de frecuencias que en conjunto las cuerdas de la guitarra pueden trabajar.

Para ser más explícito, considérese que la sexta cuerda (la más gruesa) se afina a una frecuencia cercana a 82.41 Hz, que es lo normal para ésta cuerda; podría afinarse a una frecuencia un poco más baja pero pronto la tensión en la misma no será suficiente para emitir una onda mecánica. De forma similar, considere que la primera cuerda (la más delgada) se afina a 329.63 Hz, se podría afinar a una frecuencia un poco más alta pero se corre un doble riesgo. Primero, la cuerda se romperá si la tensión supera el valor máximo de fábrica; segundo, el mástil de la guitarra se empezará a doblar debido a la excesiva tensión a la que puede soportar, e inclusive se podría quebrar si no se tiene el cuidado apropiado, lo que arruinaría el instrumento.

4.3. Frecuencia de muestreo

De acuerdo al criterio de Nyquist,

$$F_s > 2F_0$$

la frecuencia de muestreo F_s debe ser mayor al doble de la frecuencia más alta F_0 de interés. Para el afinador, la frecuencia de la nota más alta debe ser de

493.88 Hz, que corresponde a la última nota de la tercera octava, la nota Si. La frecuencia de muestreo debe ser entonces de al menos 987.86 muestras/s, pero se redondeará a 1024 muestras/s para poder aplicar el algoritmo raíz-2 y obtener la transformada de Fourier rápidamente.

Al obtener la transformada de Fourier en MATLAB de la señal adquirida se obtiene un vector que en la primera mitad contiene la banda lateral superior del espectro centrado en el origen; y en la segunda, la banda lateral inferior del espectro centrado en F_s . Dado que ambas bandas contienen la misma información, el afinador trabaja sólo con la primera mitad del vector.

La mayoría de los espectros de frecuencia que se obtienen en MATLAB requieren dos vectores, el primero contiene los valores de amplitud, y el segundo contiene los valores de frecuencia asociados a cada valor de amplitud.

El valor de frecuencia de muestreo de 1024 muestras/s es el valor mínimo de potencia par necesario. La primera de las razones para utilizar tal valor es que mientras menos muestras existan, menos operaciones se requerirán para procesar la señal y, por tanto, se obtiene una respuesta más rápida. La segunda razón es que la resolución es baja pero lo necesaria como para que el valor de posición de cada muestra corresponda al valor de frecuencia asociado. Con lo anterior ya solo se requiere el uso de un vector, lo que hará que sea mucho más fácil obtener la frecuencia correspondiente a la componente espectral de máxima amplitud.

Lo anterior significa que el afinador es capaz de detectar cambios de frecuencia de 1 Hz con un error de 0.5 Hz por la aproximación al entero más cercano que se hace del verdadero valor de frecuencia de la componente de máxima amplitud.

4.4. Parámetros del filtro anti *aliasing*

El filtro se elaboró usando la herramienta de análisis y diseño de filtros de MATLAB. Se utilizó un filtro IIR elíptico pasabajos de orden 15 con una frecuencia de paso a los 508 Hz y 4 Hz de transición hacia la banda de paro. La atenuación máxima de amplitud en la banda de paso es de 1 dB, y un mínimo de 80 dB en la banda de paro. La estructura utiliza la forma-directa II, con 7 secciones de segundo orden y una restante de primer orden.

4.5. Directorio de búsqueda

El directorio de búsqueda utilizado en la aplicación es una matriz de 508 filas y 9 columnas. Contiene todas las respuestas posibles a las distintas frecuencias máximas que detecta el programa. Las 508 filas corresponden a las frecuencias posibles del espectro de la señal; y las 9 columnas, a la información de la nota musical más cercana a esa frecuencia y la desviación porcentual asociada a la misma.

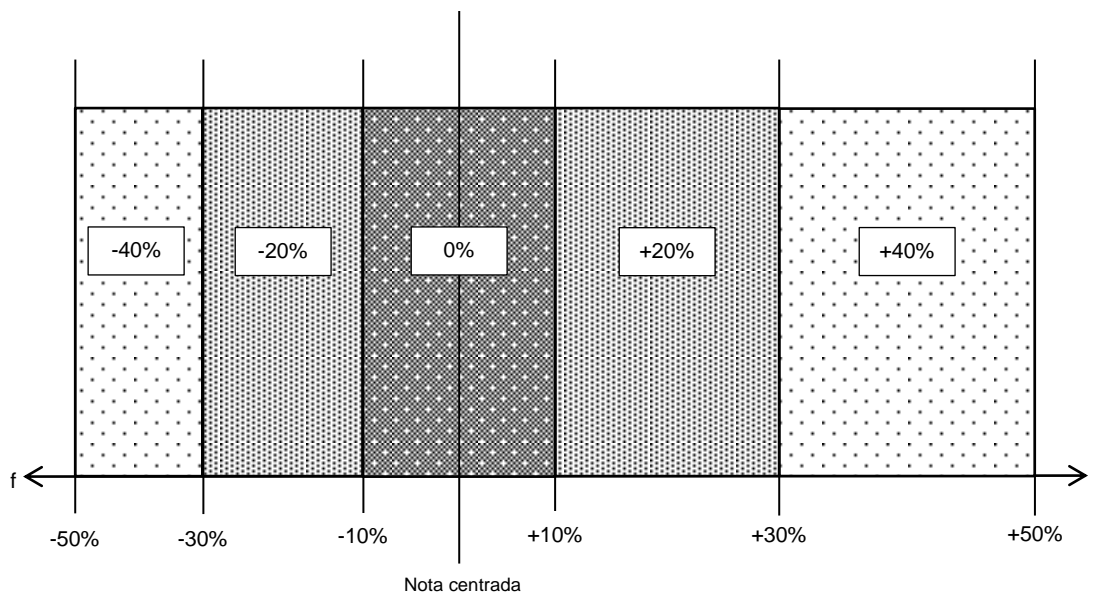
Este directorio hace que la búsqueda sea más veloz. Ahora ya no es necesario hacer un montón de comparaciones para aislar la respuesta correcta, sino que se obtiene a la primera operación.

4.5.1. Intervalos porcentuales de frecuencia

Para la desviación porcentual de cada nota musical se utilizaron 5 intervalos ilustrados en la figura 19. Se puede ver que los intervalos no son de igual tamaño. Eso se debe a que la distancia entre las notas aumenta entre notas consecutivas de mayor frecuencia. Si la frecuencia percibida está en un

intervalo porcentual de -30% a -50%, o sea, por debajo de la frecuencia central de la nota más cercana, entonces se considera que está desviada -40% de esa nota.

Figura 19. **División porcentual de una nota musical en el espectro**



Fuente: elaboración propia.

Al directorio ya se le definieron respuestas específicas para cada valor de frecuencia recibida. Para predefinirlas se utilizó la ecuación con la se obtienen las frecuencias para cada nota de una octava, pero con una pequeña modificación indicada a continuación:

$$f(o, n, p) = 440 * e^{\left(\left(o - 3 + \frac{n - 10 + \frac{p}{10}}{12} \right) * \ln 2 \right)}$$

Ahora en la ecuación se agrega un factor decimal ($p/10$) que representa el aumento porcentual para cada nota. De modo que la variable p solo puede tomar valores enteros positivos entre 0 y 10. La tabla III contiene información detallada de los resultados obtenidos al aplicar la última ecuación.

Tabla III. **División porcentual entre notas musicales (Hz)**

	# Nota	%	Int.	1 Oct. Dec.	1 Oct.	2 Oct.	3 Oct.
Sol# (G#)	8	5	-50%	100.87	101	202	403
	8	7	-30%	102.04	102	204	408
	8	9	-10%	103.23	103	206	413
	9	1	+10%	104.43	104	209	418
	9	3	+30%	105.64	106	211	423
	9	5	+50%	106.87	107	214	427
La (A)	9	5	-50%	106.87	107	214	427
	9	7	-30%	108.11	108	216	432
	9	9	-10%	109.37	109	219	437
	10	1	+10%	110.64	111	221	443
	10	3	+30%	111.92	112	224	448
	10	5	+50%	113.22	113	226	453
La# (A#)	10	5	-50%	113.22	113	226	453
	10	7	-30%	114.54	115	229	458
	10	9	-10%	115.87	116	232	463
	11	1	+10%	117.22	117	234	469
	11	3	+30%	118.58	119	237	474
	11	5	+50%	119.96	120	240	480

Fuente: elaboración propia.

La primera columna contiene el nombre de la nota en notación occidental e inglesa. También se indica si la nota es sostenida utilizando su correspondiente símbolo, numeral #.

La segunda columna contiene el número que le corresponde a cada nota de acuerdo a la tabla I. Representa los valores que toma la variable n .

La serie de valores de la tercera columna (1, 3, 5, 5, 7, 9) se repiten para cada número de nota de la columna anterior. Toman el valor de la variable p en la última fórmula.

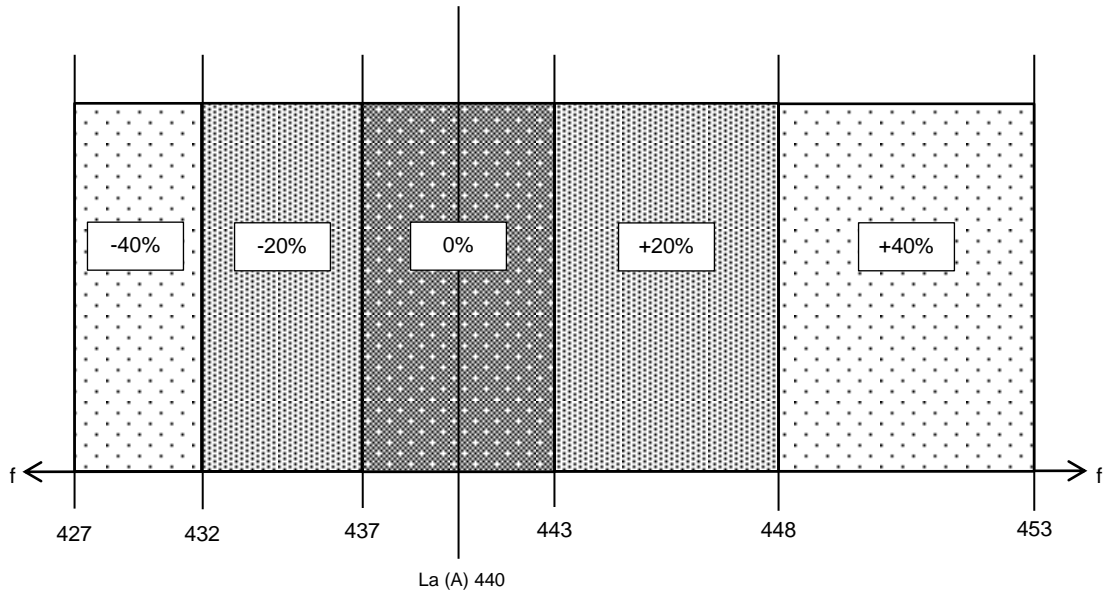
La cuarta columna está íntimamente relacionada con la tercera columna. Aunque los valores que contiene no se utilizan en ninguna ecuación, representan la etiqueta de cada fila para cada nota de la primera columna.

En la quinta columna (1 Oct. Dec.), se encuentra aplicada la ecuación de frecuencias para la primera octava. Los valores de frecuencia se han dejado con una precisión de dos decimales. Por ejemplo, si desea el valor en frecuencia de la nota $A\#$ pero con un exceso del 50% (columna 4), entonces utilizando $n = 11$, $p = 5$, y $o = 1$ en la última ecuación de frecuencias se obtiene un valor de 119.96 Hz, como lo indica la quinta columna.

Las últimas tres columnas contienen los valores en frecuencia para cada octava y redondeados al entero más cercano. Se obtienen a partir de los valores de la quinta columna multiplicados por factores de 1, 2, y 3, respectivamente.

Si se determinan los valores que definen los intervalos de la figura 19 para la nota La (A) en la tercera octava, se obtienen los valores que se observan en la última columna de la tabla III para la nota La A. El resultado gráfico se aprecia en la figura 20.

Figura 20. **División porcentual de frecuencias para la nota La (Hz)**



Fuente: elaboración propia.

4.5.2. **Vector de respuesta**

El número de fila en el directorio corresponde al valor de frecuencia utilizado durante la búsqueda. Como se ha mencionado, cada fila contiene 9 columnas o caracteres, en los primeros 2 está almacenada la nota; si la nota no es sostenida entonces se dejó el espacio en blanco (G, G#, A, etc.). En los otros 7 se encuentran el nombre y la extensión del archivo de imagen que se cargará en la interfaz gráfica y que contiene el indicador de la desviación porcentual (000.jpg, -40.jpg, +10.jpg, etc.).

4.6. El micrófono como filtro pasabajos

En el modo de afinación típica, se toma la muestra del directorio y se verifica si la frecuencia percibida está por arriba o por debajo de la frecuencia de la nota de la cuerda que se está afinando. A medida que el intérprete afina las cuerdas más gruesas se presenta un pequeño problema que vale la pena mencionar.

Los micrófonos tienen una respuesta en frecuencia de acuerdo al tipo y diseño del mismo. Pero en general, todos tienen la característica de un filtro pasabajos. Por lo que al adquirir la señal de las cuerdas más gruesas se acontecía que los armónicos de la señal tenían más potencia que la frecuencia fundamental. Lo anterior, se debe a que la frecuencia fundamental coincidía con la región de corte del micrófono. Los micrófonos utilizados en la elaboración de este trabajo son de bajo costo. De modo que al resolver éste problema, para ésta clase de micrófonos, se estaría resolviendo también para mejores modelos.

Una de las soluciones que se puso en práctica, fue multiplicar el espectro de la señal por una función matemática que aumentará la amplitud del espectro de tal forma, que se compensaran las pérdidas y que, por tanto, la señal se normalizará antes de ser procesada en el directorio. Lo cual no resultó práctico, pues en la señal adquirida, la proporción de amplitud en los armónicos variaba sustancialmente y entorpecía la detección correcta de la componente de frecuencia de máxima amplitud.

La solución utilizada al final resultó ser bastante sencilla y válida para ésta aplicación. En vez de comparar la componente de máxima potencia con sólo la frecuencia fundamental esperada, ahora se compara también con los

armónicos. Así que sin importar si la frecuencia fundamental, o alguno de sus dos siguientes armónicos resultará ser el máximo, la respuesta para la afinación siempre sería correcta.

Para esta parte del problema no se utiliza el directorio. Solo se verifica si la frecuencia percibida está fuera de los intervalos establecidos para cada nota. Ya sea por encima o por debajo de mismos, se indica si se debe aflojar o apretar la clavija, respectivamente.

4.7. Interrupción del código cíclico

Algo interesante de los objetos en MATLAB, es que pueden almacenar valores numéricos en matrices, lo que les puede dar un valor agregado en alguna aplicación. Para el afinador, se utilizó esa propiedad para romper el código cíclico del programa cuando se está ejecutando en su modo natural de afinación libre. Cuando se pone en operación el modo de afinación, el valor de la variable interna del botón de inicio toma el valor de 1. El programa luego entra al código cíclico y se mantiene en él, revisando que el valor del botón siga siendo 1. Cuando se oprime el botón de detener, se asigna el valor de 0 al botón de inicio, y un instante después se rompe el ciclo y se detiene la operación del modo de afinación.

CONCLUSIONES

1. El afinador digital es apto para ejecutarse en computadoras con cualquier tipo de hardware. Al funcionar aceptablemente en una *netbook*, que fungía como una computadora de bajos recursos, resulta evidente que funcionará en cualquier otra computadora con mejores características. Se percibieron muy pocas diferencias en el desempeño del afinador al utilizar una computadora de escritorio con un potente procesador.
2. La imposibilidad de la grabación y respuesta simultánea se resolvió utilizando algoritmos de procesamiento más eficientes. Aprovechando varias condiciones que permitieron aplicarlos, tales como la sensibilidad del oído a las variaciones de frecuencia, el conocimiento previo de la nota musical que representa cada frecuencia y la forma en que opera de una octava a otra, entre otras.
3. Además de los factores comunes en el procesado digital de sonido, se dieron a conocer otros factores que se pueden aprovechar al utilizar el software MATLAB y se demostró la facilidad con que se pueden ejecutar algoritmos que, en cualquier otro lenguaje, serían mucho más complicados de implementar o presentar similar eficiencia.
4. La sencillez de la interfaz gráfica elaborada para el afinador permitió que los usuarios, con distintos niveles de conocimiento de música, pudieran afinar cómodamente una guitarra acústica en cuestión de minutos.

RECOMENDACIONES

1. Debe insistirse en la elaboración de una mayor cantidad de trabajos de investigación en torno al eje digital, pues actualmente las tecnologías relacionadas al tema digital están evolucionando rápidamente, añadiendo nuevas vertientes para la investigación y desarrollo. Las tecnologías digitales ya han llegado a superar a las analógicas en casi todas las aplicaciones, debido a que sus ventajas representan un atractivo comercial para los desarrolladores.
2. Se deben evaluar las características de la aplicación o programa que se pretende diseñar para seleccionar el lenguaje de programación apropiado para su desarrollo. Pues cada lenguaje posee algoritmos optimizados que mejoran su desempeño en una tarea.
3. Los programas en los que se desarrollen las nuevas aplicaciones deben ser los más actualizados para que, con el pasar del tiempo y la evolución de los lenguajes de programación, no se vuelvan inmediatamente obsoletos. Pues sucede que en la actualidad, los cambios en el software y hardware de las nuevas computadoras son drásticos; y las aplicaciones que una vez se desarrollaron, dejan de ser compatibles en la nueva plataforma.

BIBLIOGRAFÍA

1. DENYER, Ralph. *Manual de guitarra*. España: Raíces, 1992. 256 p.
2. EMSIA. *Curso intensivo de sonido*. España: Excen Cap, 2002. 10 p.
3. HERRERA, Enric. *Teoría musical y armonía moderna Vol. I*. España: Antoni Bosch, 2001. 133 p.
4. INGLE, Vinay K. *Digital signal processing using MATLAB*. Stamford: Cengage Learning, 2012. 652 p.
5. OPPENHEIM, Alan V. *Discrete-time signal processing*. New Jersey: Prentice Hall, 1999. 870 p.
6. ROEDERER, Juan G. *The physics and psychophysics of music*. New York: Springer Science, 2008. 228 p.
7. STRONG, Jeff. *Home recording for musicians for dummies*. Indiana: Wiley, 2009. 368 p.
8. VOLKOV, Andrei. *¿Cómo se produce la música?* [en línea] <www.musicaperuana.com/espanol/mm.htm> [Consulta: 15 de julio 2012]

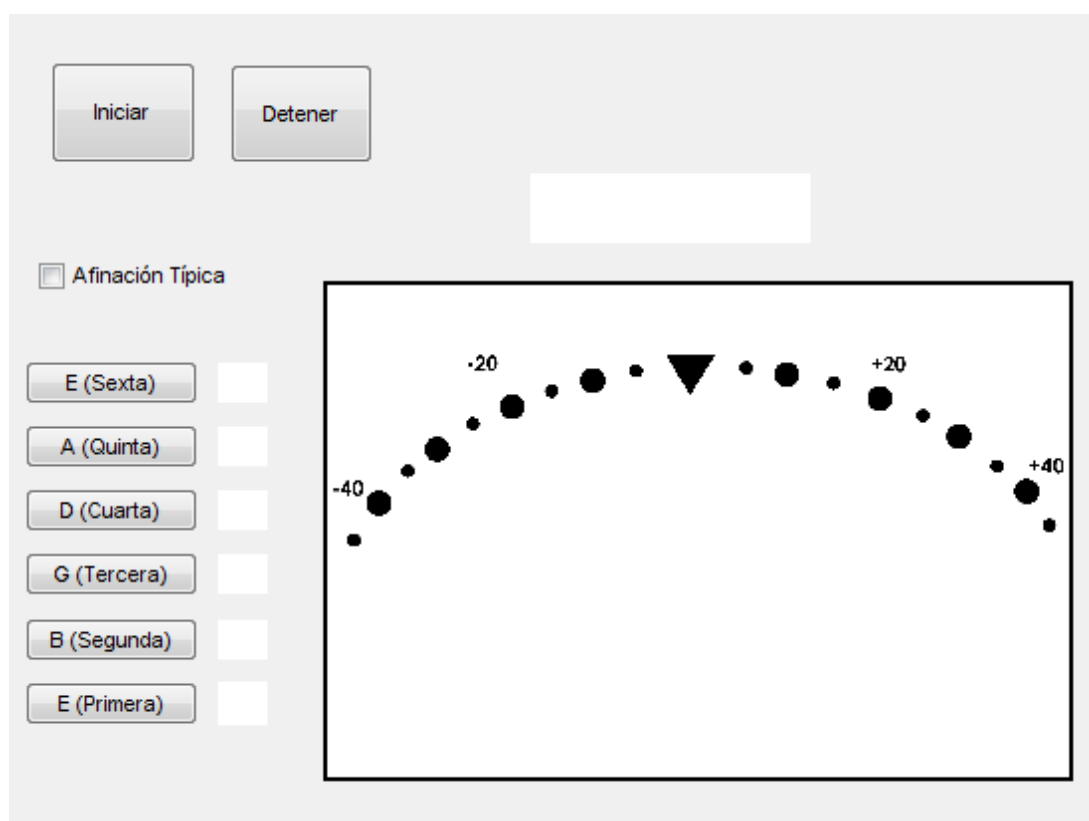
9. WOLFE, Joe. *Helmholtz Resonator*. [en línea]
<www.phys.unsw.edu.au/jw/Helmholtz.html> [Consulta: 20 de agosto 2012]

APÉNDICE

MANUAL DE USUARIO

Este manual explica al usuario como utilizar el programa de afinación para guitarra. No es necesario que el usuario sea un experto en música, es suficiente si conoce la numeración y nombre de las cuerdas.

Figura A. Interfaz del programa



Fuente: elaboración propia.

Descripción de los botones:

Iniciar: si se marcó la opción Afinación Típica el afinador funcionará en el modo de afinación típica, descrito más adelante, (ver figura A). En caso contrario el afinador funcionará en modo de afinación libre, descrito también más adelante.

Detener: el funcionamiento del afinador se detiene independientemente del modo en el que se encuentre funcionando.

E (sexta): emite durante 3 segundos el tono de la nota Mi en la primera octava correspondiente a una frecuencia de 82.41 Hz.

A (quinta): emite durante 3 segundos el tono de la nota La en la primera octava correspondiente a una frecuencia de 110.00 Hz.

D (cuarta): emite durante 3 segundos el tono de la nota Re en la segunda octava correspondiente a una frecuencia de 146.83 Hz.

G (tercera): emite durante 3 segundos el tono de la nota Sol en la segunda octava correspondiente a una frecuencia de 196.00 Hz.

B (segunda): emite durante 3 segundos el tono de la nota Si en la segunda octava correspondiente a una frecuencia de 246.94 Hz.

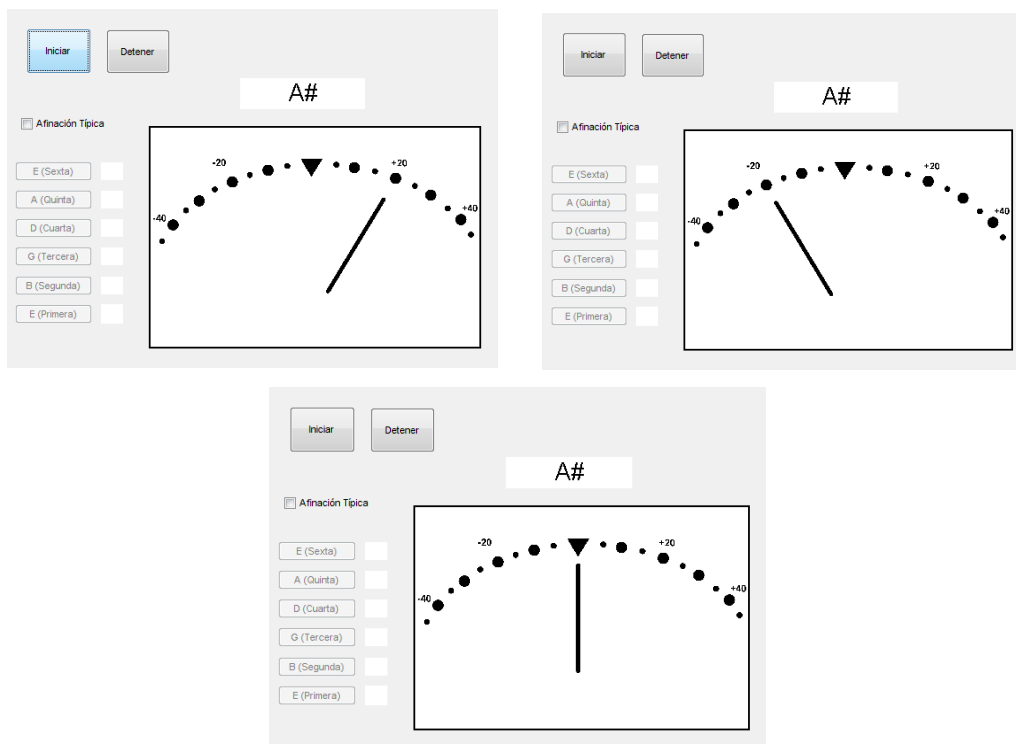
E (primera): emite durante 3 segundos el tono de la nota Mi en la tercera octava correspondiente a una frecuencia de 329.63 Hz.

Modo Afinación Libre

Este modo es capaz de detectar la nota de una cuerda en las primeras tres octavas musicales y por lo tanto, permite afinar o comparar la nota actual de una cuerda con la base de datos de las notas.

Una vez iniciado el modo y recibida la pulsación del instrumento, el afinador mostrará en la pantalla la nota que está representando la cuerda en ese momento. En el indicador se muestra a que porcentaje se está de la nota indicada en la pantalla, puede ser un 20 o 40 por ciento sobre o por debajo de la misma, (ver figura B).

Figura B. Variaciones de afinación para una misma nota

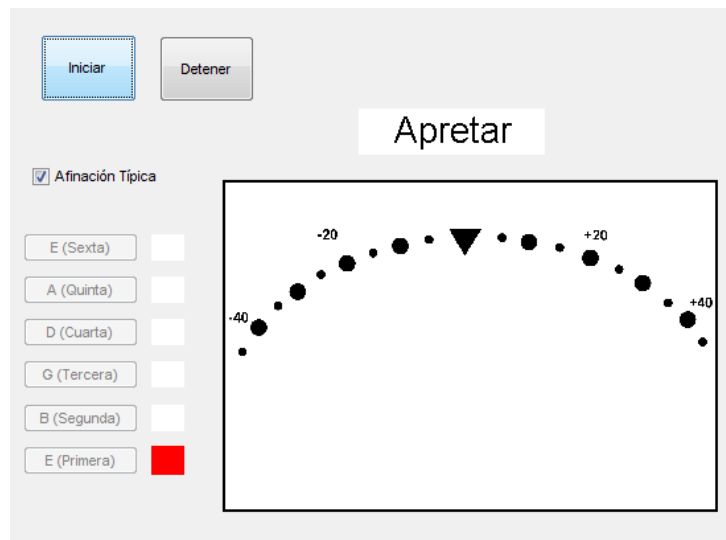


Fuente: elaboración propia.

Modo Afinación Típica (Tono natural)

Este modo es muy útil para personas sin conocimientos sobre música. Una vez iniciado este modo, el programa ayudará a afinar la guitarra desde la primera hasta la sexta cuerda indicándole al intérprete si debe apretar o aflojar la clavija que corresponde a la cuerda que se esté afinando en ese momento.

Figura C. Inicio del modo de afinación típica

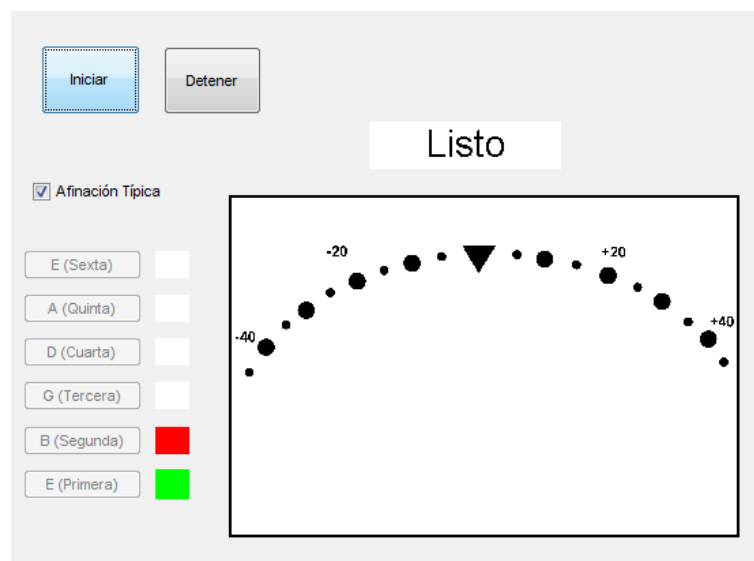


Fuente: elaboración propia.

Por ejemplo, cuando se empieza afinando la primera cuerda aparece un marcador rojo al lado del botón E (primera) indicando que la cuerda está desafinada, (ver figura C). La pantalla del programa indicará si es necesario apretar o aflojar la clavija de la primera cuerda. Cuando la cuerda esté correctamente ajustada entonces la pantalla mostrará Listo, indicando que la cuerda está afinada.

Antes de pasar a ajustar la segunda cuerda el afinador esperará recibir cinco veces seguidas la nota correcta de la primera cuerda, luego el indicador del mismo se tornará verde y el marcador de la segunda cuerda se activará y pondrá de color rojo, (ver figura D).

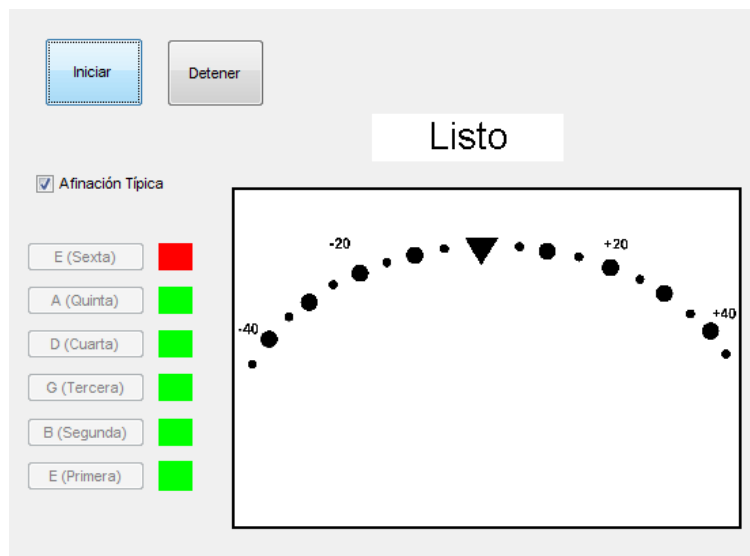
Figura D. **Afinando la segunda cuerda**



Fuente: elaboración propia.

El prodimiento anterior se repetirá hasta llegar a la sexta cuerda. Una vez afinada la sexta cuerda y que el afinador reciba cinco veces la nota correcta, éste pasará a modo de afinación típica y todos los marcadores serán verdes, (ver figura E).

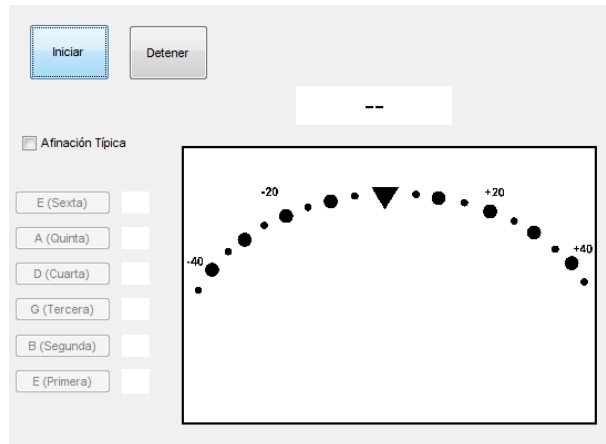
Figura E. **Afinando la sexta cuerda**



Fuente: elaboración propia.

Si la pantalla muestra dos guiones (- -) significa que la frecuencia recibida es muy alta o sólo está detectando ruido lo que se le puede atribuir a que la potencia recibida no es suficiente para ser detectada, (ver figura F). En el último caso, se puede corregir si se acerca el micrófono al instrumento o viceversa. Puede ser también que el micrófono no esté funcionando o que no esté conectado.

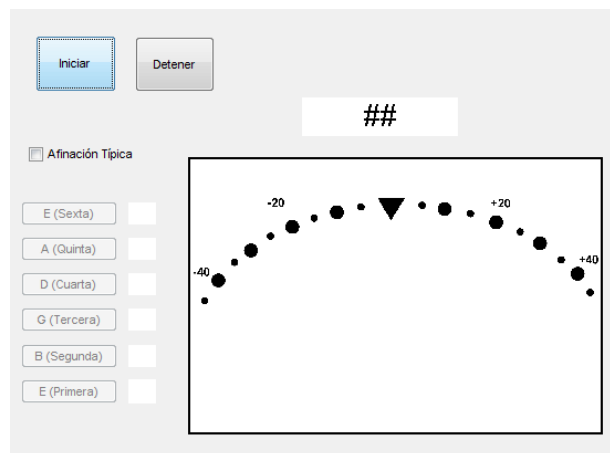
Figura F. Debajo del umbral



Fuente: elaboración propia.

Si la pantalla muestra dos símbolos de numeral (##) significa que la frecuencia recibida de mayor potencia es muy baja y no corresponde a ninguna nota musical, (ver figura G).

Figura G. Fuera de rango



Fuente: elaboración propia.

