

AFINOMATICUS 440

Fundamentación y análisis para la implementación de un afinador automático para las seis cuerdas de una guitarra con un sistema de protección por torque.

C. Sebastián González Dixon, Jorge E. Peláez Londoño, Tatiana Aparicio Vergara
gonzalez-c@javeriana.edu.co, pelaezj@javeriana.edu.co, taparicio@javeriana.edu.co
Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Electrónica.
Bogotá - Colombia, Septiembre de 2004

RESUMEN: AFINOMATICUS 440 es un sistema de afinación automático de las seis cuerdas de una guitarra. Este dispositivo se encarga de ajustar mecánicamente la tensión de cada una de las cuerdas de la guitarra de forma autónoma. Una vez seleccionada una de las cuerdas, ésta es afinada mediante el movimiento de las clavijas a través de un motor. El motor se mueve en un sentido para tensionar la cuerda y en el otro para distensionarla y de esta forma se logra una correcta afinación. El sistema tiene implementada una protección que evita el rompimiento de la cuerda que se desea afinar en caso de una mala operación del dispositivo.

PALABRAS CLAVES: Afinación automática de guitarras, filtro Butterworth, filtro controlado por voltaje, análisis de señales análogas, conversión de frecuencia a voltaje, control on-off.

I. INTRODUCCION

A pesar de que en las escuelas de música se forma a los guitarristas para tener un entrenamiento auditivo tal que les permita afinar su guitarra, es común, y cada vez más popular que se usen accesorios como diapasones, silbatos o afinadores electrónicos que dan una visualización al músico para que él ajuste su guitarra manualmente a partir de una referencia. Con el Afinomaticus 440 se busca contrarrestar los eventuales errores humanos ocasionados por los métodos convencionales de afinación. Estos errores se presentan sobre todo cuando se deben afinar varias guitarras en corto tiempo para una agrupación musical.

En la actualidad existe un sistema de afinación desarrollado por la compañía estadounidense "Transperformance"[4], que se incorpora al instrumento de forma permanente corrigiendo variaciones muy pequeñas de frecuencia (micro afinación), pero una vez instalado no puede ser usado en otras guitarra.

Para la realización de este trabajo se hizo una caracterización del sonido de la guitarra, en la cual se consideraron tanto las frecuencias fundamentales de cada tono musical, como los componentes armónicos que

caracterizan dicho instrumento. Esto se evaluó y comparó con los parámetros teóricos estudiados.

El artículo se estructura de la siguiente forma: primero se dan algunos conceptos básicos de acústica y afinación, posteriormente se muestra el resultado de la caracterización de la guitarra y finalmente se describe el funcionamiento del sistema y se presentan algunas conclusiones relevantes de este trabajo.

II. TEORIA DE AFINACIÓN

Los sonidos musicales son producidos por algunos procesos físicos que tienen un carácter periódico: una cuerda vibrando, el aire en el interior de un instrumento, etc. A pesar de las diferencias entre ellos, estos procesos tienen una característica común descrita con un mismo modelo matemático. La característica fundamental de estos sonidos es su "altura" o frecuencia. Una cuerda al ser pulsada vibra a una determinada frecuencia, dando oscilaciones en las proximidades de su posición de reposo o equilibrio.

A. *Sistemas de Afinación:*

La afinación adecuada de un instrumento ha sido objeto de varios estudios científicos. Algunas de las teorías más difundidas son las de Pitágoras (582 A.C.), Aristógenes (350 A.C.), Zarlino (1517-1590), William Holder (1614-1697). Estas teorías se agrupan en tres sistemas de afinación: "*El sistema Natural*", basado en las quintas naturales de Pitágoras, establece diferentes longitudes para los semitonos según sean diatónicos o cromáticos, así como para las notas enarmónicas. *El sistema Temperado*, atribuido por algunos historiadores a Ramos de Pareja (1440), estableció una distancia para la octava, y la dividió matemáticamente en 12 partes. Este es el sistema "inevitable" para todos los instrumentos de afinación fija, como piano, instrumentos de cuerda con trastes, de viento con llaves o pistones, etc. Y por último, *El sistema Expresivo*. Éste, más que un sistema de afinación, es un recurso que utilizan intuitivamente los instrumentos "no

temperados": familia de arcos, algunos instrumentos de viento y los cantantes. ”[1].

La Guitarra, por ser un instrumento cuya afinación se determina en el momento de su fabricación fue diseñada bajo el sistema temperado, propiedad de gran utilidad para el desarrollo de este proyecto.

B. Frecuencias naturales de las cuerdas:

Según el sistema temperado para calcular la frecuencia de cada nota, dada su escala, se usa la siguiente ecuación:

$$F_i = 440 * 2^{i/12} \quad \text{Ecuación 1.}$$

donde i es el número de trastes entre la nota La(3), 440Hz, y la que se desea encontrar. La nota La(3) corresponde al quinto traste de la primera cuerda.

Por lo tanto la frecuencias para cada una de las cuerdas de la guitarra son las siguientes:

Cuerda	Nota	Frecuencia
1	Mi	330Hz
2	Si	246.9Hz
3	Sol	196Hz
4	Re	146.8Hz
5	La	110Hz
6	Mi	82Hz

Para caracterizar el sonido de la guitarra se adquirió la señal directamente en un computador con el programa de grabación y edición “Sound Forge”. Se utilizó una frecuencia de muestreo de 44.1 kHz. con cuantización de 16 bits y posteriormente se procesó la señal con la herramienta matemática MATLAB™, obteniendo la respuesta en tiempo y frecuencia de esta señal de forma detallada. Se realizó el mismo análisis para las seis cuerdas, encontrando la distribución armónica, la forma en que el sonido se atenúa con el paso del tiempo y la forma de onda que determina el timbre, propiedad característica de este instrumento. A continuación se muestran los resultados obtenidos para la primera cuerda, Mi, afinada a 329.63 Hz.

Los resultados obtenidos sustentan la importancia de tener un buen filtro que elimine la componente armónica, pues como se ve en la figura 3 en un mismo periodo puede haber mas de dos cruces por cero. Y la determinación de la frecuencia de oscilación se hace mediante el conteo de estos cruces.

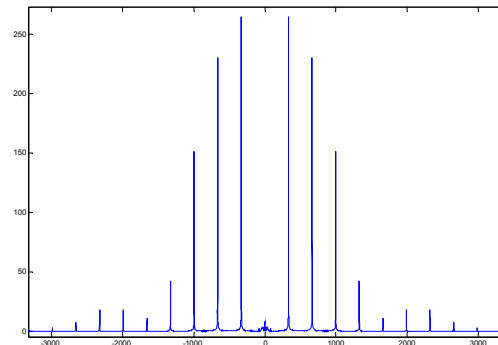


Figura 1. Descomposición espectral de la primera cuerda Mi afinada a 329.63Hz

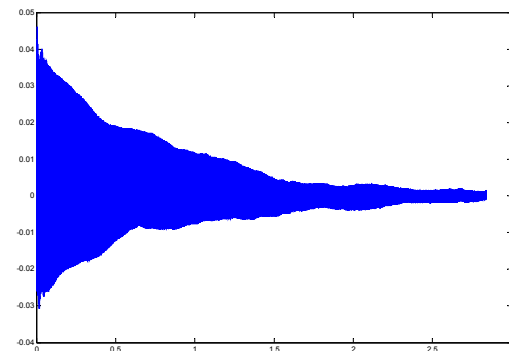


Figura 2. Forma envolvente del sonido en tiempo de la cuerda Mi afinada a 329.63Hz

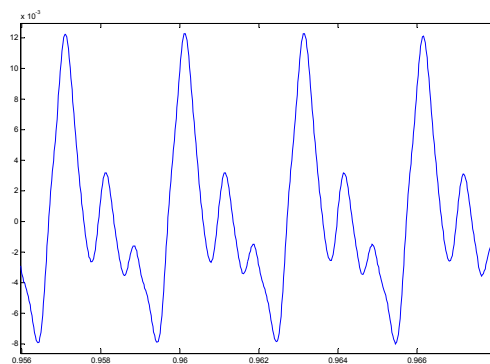


Figura 3. Forma de onda del sonido Mi en un intervalo de 12ms.

C. Sensitividad del oído:

Estudios de la discriminación en frecuencia del oído (psicoacústica) han demostrado que en bajas frecuencias, tonos con unos pocos hertz de separación pueden ser distinguidos, pero en altas frecuencias para poder discriminar los tonos se necesita que estén separados por cientos de hertz. Este comportamiento se ha modelado por medio de unas bandas de frecuencia, llamadas bandas críticas en las que la percepción del sonido es similar. Los estudios muestran que las bandas críticas son mucho más estrechas en las bajas frecuencias que en las altas; el 75% de estas bandas están por debajo de los 5 kHz.

Las bandas críticas no son fijas, son continuamente variables en frecuencia dependiendo de las señales de excitación del oído. [2]

El bark es una unidad de frecuencia porcentual; una banda crítica tiene un ancho de un bark. La escala bark relaciona la frecuencia absoluta (en Hz.) con las frecuencias medidas. Usando el bark, un sonido en el dominio de la frecuencia puede ser convertido a sonido en el dominio psicoacústico.

Un bark puede calcularse con las siguientes ecuaciones:

$$1\text{bark}(\text{hz.})=f/100 \text{ para } f < 500\text{Hz} \quad \text{Ecuación 2.}$$

$$1\text{bark}(\text{hz.})=9+4\log(f/100) \text{ para } f > 500\text{Hz.} \quad \text{Ecuación 3.}$$

III. ANTECEDENTES

Para el diseño de este dispositivo, se partió de los resultados obtenidos en un trabajo anterior realizado por este mismo grupo, el AFINOMATICUS F.F 330 (noviembre 2003), con el que se logró afinar la primera cuerda de una guitarra (Mi), con un error de 2 bark y no tenía implementado un sistema de protección para evitar romper la cuerda. En este trabajo se mejoró el dispositivo, evitando este problema y permitiendo afinar las seis cuerdas de la guitarra con una metodología diferente.

IV. DESCRIPCIÓN

El objetivo del trabajo es afinar cada una de las cuerdas de una guitarra, al igual que tener una protección para que ninguna de estas se rompa por causa de una mala operación del usuario. En este caso se usa una guitarra eléctrica para tomar la señal directamente de los *pickups* (micrófonos electromagnéticos utilizados por estas). Aunque también se podría implementar para una guitarra clásica, obteniendo la señal de audio por medio de un micrófono dinámico.

Se implementó un control *on-off* con histéresis y referencia (*set point*) variable encargado de afinar la cuerda seleccionada por el usuario. Dependiendo si la señal de la cuerda está a una frecuencia más alta o más baja con respecto a la frecuencia estándar de la nota se mueve la clavija por medio de un motor. El movimiento del motor está controlado por un puente H de tal forma que se mueve hacia un lado u otro para dejar la cuerda en la afinación deseada. Además este puente H presenta una limitación de corriente que no permite aplicar un torque mayor al máximo permitido por la elasticidad de la cuerda.

La señal que viene de la guitarra se pasa por un buffer (desacople) para evitar un divisor de voltaje producido por el acople de impedancias entre la guitarra y el sistema. La señal es pasada por un amplificador para entrar luego a un filtro Butterworth de segundo orden controlado por voltaje. Este se implemento con un amplificador de transconductancia (OTA). Con este se filtra los armónicos logrando una atenuación de 16dB por octava. A este filtro se le modifica la frecuencia de corte seleccionando un nivel adecuado de voltaje para cada una de las seis cuerdas. Luego de ser filtrada, la señal con una componente en frecuencia fundamental es pasada por un conversor de frecuencia a voltaje, el cual para cada frecuencia entrega un voltaje DC proporcional. Este voltaje entra a un comparador de ventana donde se toma la decisión para enviar la señal de control al motor. Hay seis voltajes de referencia diferentes que corresponden a cada una de las notas, los cuales son seleccionados cuando se selecciona la cuerda que se desea afinar. Cada uno de estos voltajes fue calculado teórica y experimentalmente.

La figura 4 muestra el diagrama de bloques del sistema de control.

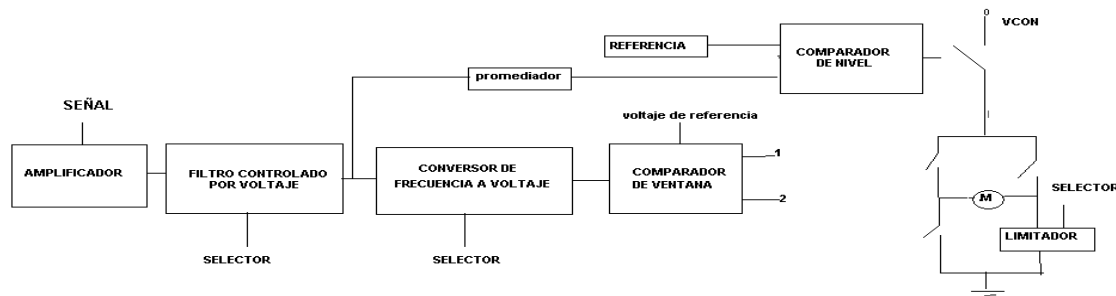


figura 4. Diagrama en bloques

El comparador de ventana tiene dos salidas que indican si la cuerda está o no afinada. Si la cuerda está afinada en las salidas 1 y 2 se obtiene tierra (un valor de cero voltios), pero si está por encima de la frecuencia de afinación la salida 1 obtiene el valor de la fuente de polarización mientras la otra permanece en tierra. Si está por debajo de la frecuencia de afinación, las dos salidas se obtienen invertidas a como se dijo anteriormente. Estas señales controlan el sentido de giro del motor.

El problema básico que presenta el comparador es que convierte todo el sistema en un control *on-off*, lo cual ocasiona que las señales que controlan el puente H nunca permitan al motor llegar a un estado de reposo. Por más atenuada que esté la señal, el comparador detectará la diferencia, causada incluso por el ruido, produciendo giro en el motor. Además cuando el error se hace cero por primera vez el motor no responde inmediatamente alcanzado a sobrepasar ligeramente la posición deseada.

Para solucionar este problema se definieron cuatro regiones de trabajo para el motor. Los dos límites de las tres regiones superiores están definidos cada uno por un nivel que se encuentre un poco por encima y por debajo del *set point* teniendo en cuenta el criterio de la banda crítica del oído. En la región intermedia, el motor debe permanecer quieto, mientras que en las otras dos, este debe moverse según el sentido que reduce el error.

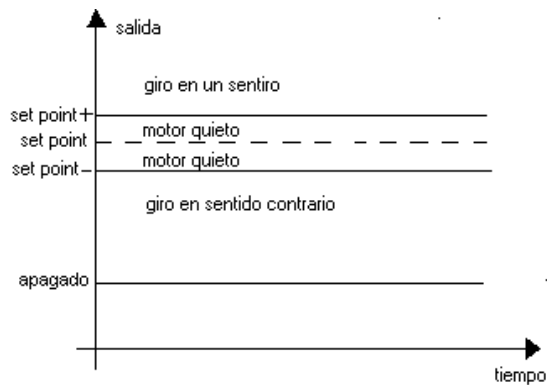


Figura 5. Regiones funcionamiento motor

La región de apagado del motor debe ocurrir cuando la frecuencia de la señal es la definida como afinada, o cuando la amplitud de la señal de la cuerda llega a cierta atenuación comparable con el ruido encontrado en el ambiente. Para esto se implementó un tercer comparador, que compara la señal filtrada y promediada con un valor de referencia, el cual debe ser sobrepasado para poder activar el sistema. La salida del comparador es la que permite que se habilite o deshabilite la fuente que maneja el puente H. En este caso es una fuente de 5 V para tener una baja velocidad del motor.

Finalmente, para implementar el mecanismo de protección, se tuvo en cuenta lo siguiente: el torque en un

motor DC es proporcional a la corriente, por lo tanto se midió la corriente máxima que se puede entregar al motor cuando la cuerda está en su máxima tensión antes de romperse y a partir de esto se dispuso la limitación. Para este fin, se limitó la corriente máxima que podía circular por el motor.

V. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Se logró montar un sistema en *hardware* que está en capacidad de afinar cualquiera de las seis cuerdas de la guitarra. Para realizar esta operación sólo es necesario que el usuario ajuste un selector y pulse la cuerda, garantizando que el sistema no romperá la cuerda.

El tamaño del dispositivo permite que sea portátil.

Los tiempos de afinación entre 20 y 40 segundos por cuerda, con un error promedio obtenido de un bark.

Se utilizó una afinación estandarizada internacionalmente con la que se realizan las grabaciones musicales.

Se podría mejorar el sistema de la siguiente manera: implementando un sistema que identificará automáticamente la frecuencia de la cuerda que se está afinando; realizando una acción de control PID que minimice el error en estado estable; no limitándose a las seis frecuencias de las cuerdas de la guitarra sino tener la opción de mover la clavija hasta una frecuencia particular que el usuario le indique; extendiendo el sistema de afinación o a otro tipo de instrumentos como pianos, arpas o violines.

VI. AGRADECIMIENTOS

A quienes se interesaron y de una u otra forma nos colaboraron en la realización de este y el anterior proyecto. Especialmente recordamos y agradecemos su apoyo a nuestra compañera Juliana Díaz y a nuestros profesores y futuros colegas Carolina Soto, Fernando Segura, Eduardo Gerlein y Juan Manuel Cruz.

REFERENCIAS

- [1] "Curso de armonía", <http://aulaactual.com/armonia/inicio/h03/h03.html>
- [2] "Música y matemática" <http://www.musicaperuana.com/espanol/mm.htm>
- [3] "Sensitividad del oído", <http://members.fortunecity.com/alex1944/psicoacustica/psycoasp.html>
- [4] "Transperformance: Performer TM" <http://www.selftuning.com>
- [5] Díaz, Juliana, González, Sebastián, Peláez, Jorge, "Afinador Semiautomático de Guitarra", Informe Final proyecto de Metodología de la Investigación 2, profesor Eduardo Gerlein, 2003-1.
- [6] "Apuntes sobre la afinación en la guitarra clásica" http://guitarra.artelinkado.com/guitarra/apuntes_sobre_afinacion_guitarra_clasica.htm