

Afinador Automático de Instrumentos de Cuerda

Leandro Borquez, Piero Araya, Cristián Contreras, Maximiliano Oyarce, Maximiliano Molina, José Barraza
Universidad de La Serena Ingeniería en Computación

Abstract—Este documento presenta el diseño e implementación de un afinador automático para instrumentos de cuerda. El sistema utiliza análisis espectral mediante series de Fourier para detectar la frecuencia fundamental de cada cuerda y un sistema mecatrónico para ajustar automáticamente la tensión. Se describe el modelado matemático, la implementación hardware con Arduino/ESP32, y los algoritmos de procesamiento digital de señales. Los resultados demuestran la efectividad del sistema para afinar guitarras con precisión comparable a afinadores comerciales.

Index Terms—Afinador automático, series de Fourier, procesamiento digital de señales, Arduino, control automático, STEM.

I. INTRODUCCIÓN

A. Problema desencadenante

La afinación manual de instrumentos de cuerda requiere entrenamiento auditivo y puede ser imprecisa para músicos principiantes. Además, en entornos profesionales se requiere rapidez y precisión. Un sistema automático resolvería estos problemas proporcionando afinación precisa independiente mente de la habilidad del usuario.

B. Limitaciones del afinado manual

El afinado manual para los instrumentos de cuerda es la manera más usual al momento de afinar un instrumento de cuerda como lo sería una guitarra, pero este método tiene varios inconvenientes tales como la falta de experiencia, la falta de exactitud ya sea por problemas auditivos o por lo mismo de la falta de experiencia musical, un instrumento de cuerda como lo es la guitarra no estaría afinada a la nota exacta y también se pueden producir ciertos inconvenientes al momento de estar afinado, como lo es que se rompa una cuerda por estar demasiado tensa y además aunque se afine el instrumento hay factores externos que hacen que varíe la afinación a lo largo del tiempo por lo que se debe de comprobar la afinación periódicamente.

C. Propuesta

Entonces como equipo se decidió por desarrollar un sistema automático para la afinación de la mayoría de instrumentos de cuerda, con la capacidad de que se acople a la mayoría de clavijeros y que pueda ajustar automáticamente las clavijas para la afinación de estos instrumentos. Además, el proyecto busca ser una solución de bajo costo y accesible, priorizando componentes económicos y un diseño simple que permita que cualquier músico, tanto principiante como experimentado, pueda utilizarlo sin necesidad de equipos profesionales.

II. OBJETIVOS

A. Objetivo General

Diseñar e implementar un sistema automático para afinar instrumentos de cuerda que combine procesamiento digital de señales y control mecatrónico.

B. Objetivos Específicos

- Aplicar series de Fourier para detección de frecuencia fundamental en señales de audio
- Diseñar el sistema mecatrónico para ajuste automático de clavijas
- Implementar algoritmos de control PID para el ajuste fino de tensión
- Validar el sistema experimentalmente comparando con afinadores comerciales o aplicaciones móviles para afinar instrumentos
- Desarrollar habilidades STEM integradas en el equipo

III. MARCO TEÓRICO

A. Teoría Musical y Afinación

En el sistema occidental el sonido musical se organiza en 12 alturas por octava. Frecuencias estándar ($A4 = 440\text{Hz}$) para la nota La en la cuarta octava en la afinación moderna. Los intervalos se miden por "cents", un semitono son 100 cents. En la música el sonido tiene 4 cualidades las cuales son

- **Altura**, calidad que determina si un sonido es agudo o grave
- **Duración** tiempo en el que se mantienen las vibraciones producidas por el sonido
- **Intensidad** la diferencia entre un sonido suave y un sonido fuerte
- **Timbre**, calidad que depende de los armónicos y de la intensidad de estos

B. Afinadores comerciales y profesionales

Un afinador es una herramienta electrónica con la capacidad de detectar las vibraciones del sonido de un instrumento y muestra si se debe de ajustar la nota, para que el instrumento esté afinado, este es el método más rápido y efectivo para lograr una afinación precisa, pero no siempre es accesible un afinador de alta calidad a un bajo precio. Afinadores por sistema

- **Afinador Estándar** Afinadores usados por la mayoría, que solo detectan las notas específicas de la afinación predeterminada de un instrumento.
- **Afinador Cromático** Estos detectan las 12 notas de la escala musical independientemente del instrumento, usado por profesionales por su versatilidad y exactitud.

- **Diapasón** Produce una nota de referencia inmutable generalmente la de 440 Hz, es el método más clásico para afinar un instrumento.

Afinadores por formato



Fig. 1: Afinador Cromático

Variaciones de los distintos afinadores

- **Afinador de Pinza** Estos se ajustan directamente al instrumento, leen las vibraciones directamente, lo que garantiza una afinación precisa en ambientes ruidosos, estos se ajustan a la clavijera o al mástil de un violín.
- **Compacto** Estos afinadores son para llevarlos en el bolsillo ideales para viajar con ellos, generalmente son del tipo **cromático**, con una entrada jack para guitarras eléctricas o bajos.
- **Afinador de pedal** Para guitarras y bajos eléctricos donde se usa el pedal de efectos, permiten afinar directamente mientras se está tocando, pudiendo activarlos y desactivarlos a voluntad.

IV. PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES

1) Series de Fourier:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(\frac{n\pi}{L}x) + b_n \sin(\frac{n\pi}{L}x)) \quad (1)$$

2) *Transformada Rápida de Fourier (FFT)*: Algoritmo para cálculo eficiente del espectro de frecuencia con la FFT, descomponiendo la señal de audio de la cuerda en sus componentes de frecuencia, donde el pico de mayor amplitud es la **frecuencia fundamental**.

A. Percepción del pitch

La frecuencia fundamental y armónicos, la frecuencia fundamental define la altura percibida de un sonido lo que sería su **pitch**, mientras que los armónicos son las diferentes "distancias" que se tienen para recorrer para cada nota, haciendo que los armónicos sean los múltiplos enteros de esta frecuencia fundamental.

Por lo que se puede concluir que un sonido consta de su frecuencia fundamental, seguido de los armónicos múltiples de esta frecuencia fundamental.

B. Descomposición espectral

Por medio de la FFT se va a descomponer el sonido de las cuerdas, mostrando su frecuencia fundamental y permitiendo compararla con la frecuencia de referencia de 440Hz.

C. Teoría de Control

Control PID para el sistema de ajuste de tensión donde el controlador automático iterativo ajusta el motor en bucle cerrado. Que calcula los pasos en función del error

$$u(t) = \min \left(n_{max} \frac{|cents|}{cents - por - paso} \right) \quad (2)$$

El controlador proporcional-integral-derivativo o PID, se encargará de decidir cuánto y en qué sentido se debe de mover el motor a paso a paso que tensa o afloja la cuerda y así alcanzar la frecuencia deseada para cada cuerda. Entonces la misión de este controlador es la de traducir el error instantáneo en **cents** en una cantidad entera de pasos del motor, lo que permite que:

- 1) Corrija la desviación en un instante
- 2) Que no sobrepase los límites del clavijero.

V. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

A. ¿Cómo se debe afinar una guitarra?

El estándar para la afinación de guitarras es de (mi-la-re-sol-si-mi) donde la sexta cuerda corresponde a la nota Mi (E), la quinta en La (A), la cuarta en Re (D), la tercera en Sol (G), la segunda en Si (B) y la primera cuerda afinada también en Mi (E). La frecuencia referencial más común es la de 440Hz.

B. Temperamento igual

El temperamento igual divide la octava en 12 partes iguales, a los que se les conoce como semitonos. Un semitono sería el espacio más pequeño entre las notas en el sistema occidental, donde cada semitono va a medir la distancia de $\sqrt[12]{2}$. Esta distancia mínima permite calcular la frecuencia de todas las notas con esta fórmula $(\sqrt[12]{2})^n * f$, donde f será la frecuencia de la nota de referencia y n es el número de semitonos que se quiere subir a partir de la nota de referencia.

C. Cuerdas vibrantes

En una cuerda su vibración será una onda cuyo sonido producido será una frecuencia constante, las cuerdas vibrantes son la base de los instrumentos de cuerda como la guitarra, el violín o el piano. Donde su funcionamiento sigue las leyes de Mersenne, que se podría resumir en estos tres principios

- Más corta la cuerda, más alta es la frecuencia del modo fundamental o una cuerda más corta produce una nota más aguda.
- Más grande la tensión, más alta es la frecuencia fundamental o una cuerda más tensa vibra más rápido, produciendo una nota más aguda.
- Más liviana la cuerda, más alta es la frecuencia del modo fundamental o entre más liviana una cuerda más aguda es la nota que produce.

VI. DISEÑO DEL SISTEMA

A. Arquitectura General

El sistema debe de

- 1) **Capturar** el audio del micrófono
- 2) **Procesar** la señal y usar la FFT para encontrar la frecuencia fundamental

- 3) **Comparar** la frecuencia medida con la frecuencia objetivo de cada cuerda, con la tabla de frecuencia del temperamento igual
- 4) **Controlar** los motores para aumentar o disminuir la tensión
- 5) **Iterar** Repetir el proceso hasta que el instrumento esté afinado

Diagrama de la secuencia

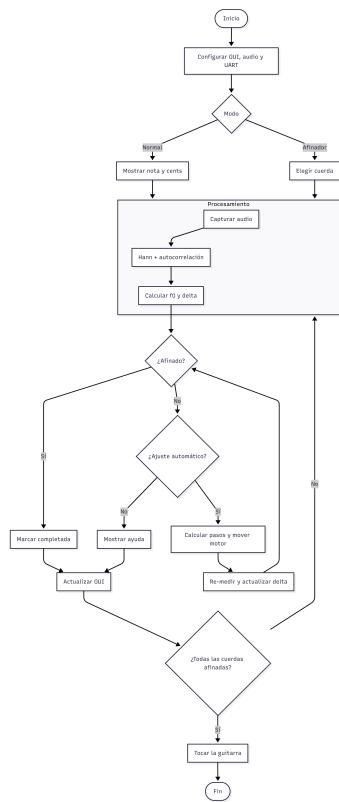


Fig. 2: Diagrama DFD

B. Modelado Matemático REVISAR

1) *Modelo de la Cuerda:* Ecuación de onda para cuerdas vibrantes:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (3)$$

2) *Relación Tensión-Frecuencia:* Ley de Mersenne. Esta función convertirá el error δ en acción mecánica sin la necesidad de medir el tiempo T, L, μ :

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}} \quad (4)$$

La solución de estas ecuaciones permite convertir el error calculado en cents, en un número discreto de pasos para el motor calculando experimentalmente la ganancia.

VII. ESTADO DEL ARTE

Realizando un análisis de los afinadores digitales existentes, así como de las aplicaciones móviles actuales, se observa que el mercado ofrece una amplia variedad de herramientas para la afinación. Sin embargo, la gran mayoría de estos dispositivos aún requiere que el usuario realice el ajuste manual del instrumento. En contraste, los sistemas semiautomáticos y automáticos de afinación representan solo una fracción muy pequeña del mercado, convirtiéndose en productos de nicho debido a su alto costo, complejidad mecánica o falta de accesibilidad.



Fig. 3: Afinador automático

Históricamente, el estudio de la afinación y del análisis de frecuencias comenzó a formalizarse a mediados del siglo XX, cuando surgieron las primeras investigaciones en procesamiento digital de señales (DSP). Con la aparición de los primeros computadores en la década de 1960, se desarrollaron las bases matemáticas de la Transformada Rápida de Fourier (FFT), introducida por Cooley y Tukey en 1965, lo que permitió analizar señales musicales con mucha mayor eficiencia. Estas herramientas fueron inicialmente utilizadas para fines militares y de telecomunicaciones, como análisis espectral de señales de radar, sonar y comunicaciones de radio. Con el tiempo, la tecnología migró hacia aplicaciones recreativas, educativas y artísticas, impulsando su uso en el estudio del sonido y la música.

Desde la década de 1980, el procesamiento de audio digital comenzó a integrarse en sintetizadores, afinadores electrónicos de mano y equipos de grabación profesional. A inicios de los años 2000, el avance de los microcontroladores y sensores más económicos permitió que proyectos académicos y experimentales exploraran la afinación automática mediante motores de precisión y algoritmos que detectan la frecuencia fundamental de cuerdas en vibración. Diversas investigaciones han empleado técnicas basadas en FFT, autocorrelación, filtros digitales y análisis espectral avanzado para lograr una estimación precisa del tono musical.

En el ámbito académico, se han desarrollado numerosos trabajos enfocados en la afinación digital y el control automatizado de instrumentos musicales. Algunos estudios abordan algoritmos de detección de pitch robustos al ruido, mientras que otros se concentran en la construcción de sistemas electromecánicos capaces de ajustar tensiones de cuerdas. Incluso

existen proyectos que implementan sistemas completos de afinación automática, diseñando actuadores controlados por microcontroladores para manipular clavijas de instrumentos de cuerda de manera autónoma.

Con el crecimiento de la computación embebida y el acceso a plataformas como Arduino, ESP32 y Raspberry Pi, la investigación reciente se ha orientado hacia sistemas más compactos, energéticamente eficientes y accesibles para el público general. Esto ha permitido desarrollar prototipos económicos y portátiles con capacidades que antes solo se encontraban en dispositivos profesionales de alto costo.

En conclusión, aunque existe un cuerpo importante de estudios y prototipos relacionados con la afinación automática, la mayoría no se ha traducido en productos comerciales ampliamente accesibles. Esto refuerza la necesidad de soluciones de bajo costo, simples de usar y capaces de adaptarse a distintos instrumentos, especialmente en contextos educativos, recreativos y artísticos.

VIII. IMPLEMENTACIÓN

A. Hardware

- Microcontrolador: Arduino/ESP32
- Sensor: Micrófono
- Actuadores: motores paso a paso
- Mecanismo: Adaptador para clavijas



Fig. 4: Afinador

B. Software

TABLE I: Librerías de Python utilizadas y su función

Librería	Función
Cálculo numérico eficiente, manejo de matrices y operaciones matemáticas avanzadas. <code>numpy</code>	
Creación de interfaces gráficas en Python. <code>heightkinter.ttk, messagebox</code>	
Cola doble eficiente, útil para almacenar historial o aplicar suavizado temporal. <code>heightqueue</code>	
Creación de figuras científicas para gráficos personalizados. <code>heightFigureCanvasTkAgg</code>	
Comunicación con dispositivos mediante puerto serie (por ejemplo, ESP32). <code>heightserial</code>	
Manejo de tiempos, pausas y temporizadores. <code>heightthreading</code>	

IX. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

A. Configuración de Pruebas

Procedimiento para validación del sistema, instrumentos de medición, criterios de evaluación.

B. Métricas

- Precisión en cents
- Tiempo de afinación
- Consistencia entre cuerdas

X. CONCLUSIONES

El desarrollo de este afinador automático demostró que es posible construir un sistema funcional, económico y accesible capaz de afinar instrumentos de cuerda sin intervención manual del usuario. Mediante el uso de análisis espectral basado en FFT, un control mecatrónico simple y materiales fáciles de obtener, se logró implementar un prototípico que identifica la frecuencia fundamental de las cuerdas y ajusta su tensión de manera autónoma.

El proyecto permitió integrar conocimientos de teoría musical, procesamiento digital de señales y control automático, mostrando que tecnologías actuales como Arduino o ESP32 son suficientes para acercar soluciones de afinación automática a estudiantes, músicos principiantes y usuarios sin experiencia técnica. Además, el diseño modular facilita futuras mejoras, como aumentar la precisión del algoritmo, optimizar el sistema de sujeción a las clavijas o incorporar diferentes modos de afinación.

En conclusión, el afinador casero desarrollado cumple con los objetivos planteados, ofreciendo una alternativa funcional y de bajo costo frente a los afinadores automáticos comerciales, y demostrando que la combinación de hardware accesible y algoritmos DSP bien implementados permite obtener resultados satisfactorios en aplicaciones musicales reales.

AGRADECIMIENTOS

REFERENCES

- [1] J. O. Smith, *Mathematics of the Discrete Fourier Transform*, 2020.
- [2] J. G. Proakis y D. G. Manolakis, *Digital Signal Processing*, Prentice Hall, 2007.
- [3] B. Pardo y W. P. Birmingham, *Achieving Robust Performance in an Automatic Guitar Tuner*, 2004.
- [4] Documentación oficial de Arduino, <https://www.arduino.cc/>
- [5] Artículo sobre afinadores, <https://goldmusiccenter.com/post-todo-sobre-afinadores-15#:~:text=Un%20afinador%20es%20un%20dispositivo,de%20lograr%20una%20afinaci%C3%B3n%20impecable.>
- [6] Detlev André Chafchalaf Peña http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0342_EO.pdf#:~:text=Se%20incluye%20una%20breve%20teor%C3%AAda%20musical%20para,tarjeta%20de%20sonido%20de%20la%20computadora%2C%20que
- [7] Mohammad Mainul Hasan, Desarrollo de un afinador de guitarra acústica y una interfaz gráfica de usuario (GUI) utilizando MATLAB <https://journals2.ums.ac.id/index.php/arstech/article/view/1185#:~:text=Abstract,high%20sensitivity%20of%20traditional%20ones.>
- [8] Portelli, L. (2003). Universidad del Valle de Guatemala. <https://repositorio.uvg.edu.gt/handle/123456789/489>