



**Diseño e implementación de un prototipo de afinador automático para violín
universal para el aprendizaje inicial y medio del instrumento sin alterar su
arquitectura funcional**

Reyes Beltrán, Diego Alejandro

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Trabajo de titulación

previo a la obtención del título de Ingeniero en Mecatrónica

Ing. Echeverría Yánez, Jaime Fernando Mg.

04 de agosto de 2021



Document Information

Analyzed document	DOCUMENTO DE TITULACIÓN - REYES DIEGO.pdf (D111137333)
Submitted	8/10/2021 1:58:00 PM
Submitted by	Echeverria Yanez Luis Manuel
Submitter email	jfecheverria@espe.edu.ec
Similarity	1%
Analysis address	jfecheverria.espe@analysis.arkund.com

**JAIME
FERNANDO
ECHEVERRI
A YANEZ**
 Firmado digitalmente por
 JAIME FERNANDO
 ECHEVERRIA YANEZ
 Fecha: 2021.08.18
 07:19:50 -05'00'

Sources included in the report

SA	Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / Tesis_serrano_perez.docx Document Tesis_serrano_perez.docx (D46396760) Submitted by: exserrano@espe.edu.ec Receiver: lfescobar.espe@analysis.arkund.com		1
W	URL: https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/28834/TFG_Sergio_Sanchez_Rodriguez_2017.pdf?sequence=1 Fetched: 12/21/2019 7:43:23 AM		1
SA	Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / Tesis 4.pdf Document Tesis 4.pdf (D24559798) Submitted by: djmendoza@espe.edu.ec Receiver: djmendoza.espe@analysis.arkund.com		1
W	URL: http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/10808/T621.3822%20G984.pdf?sequence=1&isAllowed=y Fetched: 12/18/2020 7:22:12 AM		1
W	URL: https://core.ac.uk/download/pdf/288498215.pdf Fetched: 7/21/2020 11:27:07 AM		2
W	URL: https://site.ieee.org/sb-utnfrsn/2018/04/24/afinador-guitarra/ Fetched: 8/10/2021 1:59:00 PM		1
W	URL: https://uelectronics.com/producto/max4466-amplificador-de-microfono-electret/ Fetched: 8/10/2021 1:59:00 PM		1
W	URL: https://www.smart-prototyping.com/1_3-inch-OLED-Display-SH1106-SPI-I2C-128-64 Fetched: 8/10/2021 1:59:00 PM		2
W	URL: https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/8176/1/T-ESPEL-MEC-0019.pdf Fetched: 11/16/2019 1:28:12 AM		1
W	URL: https://pdfs.semanticscholar.org/b546/e7bd3c007d5ab40e9a8e5ca8d0b2ffa8b22d.pdf Fetched: 8/10/2021 1:59:00 PM		1



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “**Diseño e implementación de un prototipo de afinador automático para violín universal para el aprendizaje inicial y medio del instrumento sin alterar su arquitectura funcional**” fue realizado por el señor **Reyes Beltrán Diego Alejandro**, el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 04 de agosto de 2021

Firma:

JAIME FERNANDO
ECHEVERRIA YANEZ
2021.08.04 19:48:17
-05'00'

Ing. Echeverría Yánez, Jaime Fernando Mg.

C.C.: 170918071-3



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Yo, **Reyes Beltrán Diego Alejandro**, con cédula de ciudadanía n° 180478510-1, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“Diseño e implementación de un prototipo de afinador automático para violín universal para el aprendizaje inicial y medio del instrumento sin alterar su arquitectura funcional”** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 04 de agosto de 2021

Firma:

Reyes Beltrán, Diego Alejandro

C.C.: 180478510-1



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Yo, **Reyes Beltrán Diego Alejandro**, con cédula de ciudadanía n° 180478510-1, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“Diseño e implementación de un prototipo de afinador automático para violín universal para el aprendizaje inicial y medio del instrumento sin alterar su arquitectura funcional”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 04 de agosto de 2021

Firma:

Reyes Beltrán, Diego Alejandro

C.C.: 180478510-1

DEDICATORIA

A Dios quién es el que hace posible todos los eventos importantes en mi vida y que ha permitido culminar ésta etapa maravillosa de mi vida, a mis padres Lorena B. y Patricio R., que siempre me han dado todo el apoyo moral y económico desde que nací, a mi hermano Gabriel R., que ha sido mi ejemplo a seguir y han estado conmigo desde siempre, a toda mi familia que siempre me ha respaldado, a mis preciados amigos y amigas que me han dado la mejor medicina del mundo, la risa y alegría, y en especial a Mayra T. que me ha dado siempre esas ganas de seguir luchando por mis sueños y ayudado en todo lo que me he propuesto. A todos mis queridos maestros que han sembrado en mí una semilla de conocimiento con su confianza y aprecio, además, dedico este trabajo a todos los músicos y artistas del Ecuador que buscan siempre crear arte con sus canciones u obras, pues somos esa luz de esperanza que damos a todos aquellos que aprecian y escuchan nuestras creaciones. Y, por último, dedico este trabajo a mi amado hermano Andrés R., que Dios lo tenga en su gloria, que siempre creyó en mí desde que nací y me acompañó en los momentos más difíciles de mi vida, este logro va por ti.

Diego Alejandro Reyes Beltrán

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer primeramente a Dios por darme salud y haber culminado con éxito este proyecto de titulación, a mis padres Lorena B. y Patricio R., a ellos les debo todos mis triunfos como persona y como profesional. A mis dos hermanos queridos, a Gabriel R., por siempre ayudarme a cumplir mis metas, además de ser un ejemplo para mi vida y, segundo, agradezco infinitamente a mi hermano Andrés R., que ahora ya no se encuentra físicamente en este mundo, pero lo siento conmigo en espíritu, fue quien me enseñó a reír y a ver la vida como en realidad es, con todas sus tristezas y alegrías. A todos mis maestros que me han ayudado siempre ante cualquier duda o problema, agradezco a todos mis amigos y amigas que sin interés alguno me han dado su amistad y apoyo, a Mayrita T., que fue siempre un pilar de luz y de refugio tanto espiritual como físico. Agradezco al Conservatorio de música “Bolívar” de la ciudad de Ambato, y en especial, a Diego T. y a Byron O., que me han brindado todas las facilidades en el desarrollo del presente proyecto, de igual manera, a su rector, Juan S. que ha facilitado todo el trámite correspondiente. Por último, agradezco de manera especial al Ing. Jaime Echeverría por su guía en la realización de este proyecto.

Diego Alejandro Reyes Beltrán

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Trabajo de titulación	1
Hoja de resultados de la herramienta Urkund.....	2
Certificado del director	3
Responsabilidad de autoría	4
Autorización de publicación	5
DEDICATORIA.....	6
AGRADECIMIENTO	7
ÍNDICE DE CONTENIDOS	8
ÍNDICE DE TABLAS	13
ÍNDICE DE FIGURAS	16
RESUMEN.	21
ABSTRACT	22
Capítulo I:.....	23
Generalidades.....	23
Presentación.....	23
Definición del Problema.....	24
Justificación e Importancia	26
Área de Influencia.....	28
Alcance General del Proyecto De Investigación	29

Limitaciones.....	29
Consideraciones Éticas	30
Viabilidad del estudio.....	31
Motivación del estudio	31
Objetivos.....	32
Objetivo General.....	32
Objetivos Específicos	33
Alcance del Proyecto.....	33
Componentes Mecánicos	33
Componentes Electrónicos/Eléctricos	35
Componentes del Sistema de control.....	36
Software para Implementación, análisis y simulación	38
Subsistema de Obtención de la Frecuencia y Control	39
Subsistema de Giro y Avance	40
Estructura del Documento	41
Capítulo II:.....	43
Marco Teórico	43
El sonido.....	43
Cualidades del sonido	45
La altura o tono.....	45
Duración o Tiempo de sonido.....	47

	10
Intensidad.....	47
Timbre	49
Afinación.....	55
Afinadores	56
Afinadores digitales	56
Afinadores automáticos o mecánicos.....	58
Sistema de control.....	60
Partes de un sistema de control	62
Clasificación de los Sistemas de Control	62
Tipos de controladores	65
FFT (Fast – Fourier Transform).....	67
Vibración de una cuerda.....	70
Impresión 3D	72
Método FDM o por extrusión de material	73
Materiales de impresión 3D por FDM.....	74
ESTUDIO DEL ARTE	75
Trabajos nacionales:	75
Trabajos internacionales:	79
Glosario de Términos	83
Afinación del violín.....	83
La Escala Temperada.	83

	11
Violín.....	85
Afinación de las cuerdas de un violín	87
Clavija.....	88
Encoder Efecto de Hall (Codificador)	88
Capítulo III:.....	91
Diseño mecatrónico	91
Diseño del sistema.	92
Requerimientos de diseño.....	92
Propuesta de Sistema	93
Diseño de dominio específico.....	93
Sistema mecánico	93
Sistema Eléctrico.....	108
Sistema Informático.....	121
Integración del sistema.....	134
Soldadura de componentes.....	134
Unión de componentes.....	136
Sistema HMI - OLED	145
Capítulo IV:	149
Pruebas y resultados.	149
Pruebas de componentes eléctricos	149
Prueba del módulo del micrófono.....	149

Prueba del motor lineal.....	150
Prueba y resultados del sistema integrado	150
Análisis de costos y estudio de mercado	167
Capítulo V:	171
Conclusiones y recomendaciones.	171
Conclusiones.....	171
Recomendaciones.....	172
Bibliografía	174
Anexos.....	179

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Explicativa de las funciones que permite la interfaz HMI implementada</i>	37
Tabla 2 <i>Iniciales ADSR.....</i>	51
Tabla 3 <i>Longitud en centímetros del violín y la edad recomendada según la edad del estudiante.....</i>	87
Tabla 4 <i>Requerimientos del prototipo – Afinador automático para violín.</i>	92
Tabla 5 <i>Propiedades mecánicas del PLA para la simulación.....</i>	96
Tabla 6 <i>Resultados de las pruebas de tensión de los compositos de PLA/fibra de carbono.....</i>	97
Tabla 7 <i>Propiedades de polímeros utilizados como materiales de empaque.....</i>	97
Tabla 8 <i>Matriz de selección del motor de giro</i>	100
Tabla 9 <i>Eficiencia del motor en 15 Kg.cm</i>	103
Tabla 10 <i>Matriz de selección del motor lineal.....</i>	105
Tabla 11 <i>Matriz de selección del Microcontrolador.....</i>	108
Tabla 12 <i>Matriz de selección del Micrófono.....</i>	110
Tabla 13 <i>Características del micrófono Electret MAX 4466</i>	112
Tabla 14 <i>Matriz de selección de la pantalla.....</i>	112
Tabla 15 <i>Características de la pantalla OLED SH1106.....</i>	114
Tabla 16 <i>Matriz de selección de la fuente de energía (Batería)</i>	115
Tabla 17 <i>Suma de Corrientes TOTAL</i>	116
Tabla 18 <i>Pines de conexión de acuerdo a las especificaciones de cada componente</i>	118
Tabla 19 <i>Configuración del controlador de la FFT para la frecuencia.....</i>	132
Tabla 20 <i>Parámetros de impresión Cura 4.6.1 para el PLA con fibra de carbono</i>	136

Tabla 21	<i>Valores máximo del motor lineal para su desplazamiento.....</i>	150
Tabla 22	<i>Respuestas de los alumnos a las interrogantes</i>	151
Tabla 23	<i>Respuestas en frecuencia, Madre de Valeria. 1era Pasada.....</i>	153
Tabla 24	<i>Respuestas en frecuencia, Madre de Valeria. 2da Pasada.....</i>	153
Tabla 25	<i>Respuestas en frecuencia, Madre de María Paz. 1era Pasada</i>	154
Tabla 26	<i>Respuestas en frecuencia, Madre de María Paz. 2da Pasada.....</i>	154
Tabla 27	<i>Respuestas en frecuencia, Luciana. 1era Pasada</i>	155
Tabla 28	<i>Respuestas en frecuencia, Luciana. 2da Pasada</i>	155
Tabla 29	<i>Respuestas en frecuencia, Madre de Luciana. 1era Pasada</i>	155
Tabla 30	<i>Respuestas en frecuencia, Madre de Luciana. 2da Pasada</i>	156
Tabla 31	<i>Respuestas en frecuencia, Julian. 1era Pasada</i>	156
Tabla 32	<i>Respuestas en frecuencia, Julian. 2da Pasada.....</i>	157
Tabla 33	<i>Respuestas en frecuencia, Sol. 1era Pasada.....</i>	157
Tabla 34	<i>Respuestas en frecuencia, Sol. 2da Pasada.....</i>	157
Tabla 35	<i>Respuestas en frecuencia, Madre de Elian. 1era Pasada.....</i>	158
Tabla 36	<i>Respuestas en frecuencia, Madre de Elian. 2da Pasada.....</i>	158
Tabla 37	<i>Resumen de respuestas y Error de desviación Estándar.....</i>	159
Tabla 38	<i>ANOVA, estudio de si el tamaño del violín influye en el porcentaje de error</i>	159
Tabla 39	<i>Hipótesis nula</i>	160
Tabla 40	<i>Comparación de medias.....</i>	160
Tabla 41	<i>Valores del controlador PI</i>	161
Tabla 42	<i>Costo de materiales y prestación de servicios desde que se inició hasta que se concluyó.....</i>	167
Tabla 43	<i>Costos Indirectos y directos del prototipo funcional</i>	168
Tabla 44	<i>Costos Mano de Obra y Programación</i>	168

Tabla 45 *Costo Total del proyecto*..... 169

Tabla 46 *Costo de materia prima para una serie de 10 afinadores*..... 169

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Componentes Mecánicos</i>	34
Figura 2 <i>Componentes eléctricos / electrónicos</i>	36
Figura 3 <i>Componentes del Sistema de Control</i>	37
Figura 4 <i>Componentes de Software, simulación e implementación</i>	39
Figura 5 <i>Subsistema de Obtención de la Frecuencia y Control</i>	40
Figura 6 <i>Símil mecánico de una onda sonora</i>	43
Figura 7 <i>Vibración de las ondas partiendo de un foco</i>	44
Figura 8 <i>Proyección del sonido en un medio</i>	45
Figura 9 <i>Relación de las 12 notas musicales y sus octavas con la frecuencia en Hz</i> ... 46	46
Figura 10 <i>Curvas Isofónicas Calculadas Por Robinson Y Dadson (I.S.O 226)</i>	49
Figura 11 <i>Envolvente ADSR</i>	50
Figura 12 <i>Envolvente ADSR. Piano y violín, respectivamente</i>	51
Figura 13 <i>Descomposición espectral de algunos instrumentos musicales</i>	52
Figura 14 <i>Gráfica de la función $f(x)$</i>	53
Figura 15 <i>Análisis de Fourier, Armónicos</i>	54
Figura 16 <i>Gráfica de la función f_x</i>	54
Figura 17 <i>Forma de onda cuadrada, Armónicos</i>	55
Figura 18 <i>Escala Cromática de igual temperamento</i>	56
Figura 19 <i>Afinadores electrónicos comerciales, marca Korg</i>	57
Figura 20 <i>Unidad de Afinación atrás del mástil, marca Gibson</i>	58
Figura 21 <i>Dispositivo desarmado con sus componentes</i>	59
Figura 22 <i>TunerMatic</i>	59
Figura 23 <i>Diagrama de un proceso</i>	61

Figura 24	<i>Formas de entrada.....</i>	61
Figura 25	<i>Tostadora, Sistema no automático.</i>	63
Figura 26	<i>Diagrama de un sistema Automático</i>	64
Figura 27	<i>Funcionamiento del Control On- Off con histéresis</i>	65
Figura 28	<i>Representación de un controlador PID.....</i>	67
Figura 29	<i>Suma de ondas. Descomposición de las mismas.....</i>	69
Figura 30	<i>FFT aplicada, respuesta en dominio de tiempo y de frecuencia.....</i>	70
Figura 31	<i>Método de propagación de las ondas.....</i>	71
Figura 32	<i>Proceso de manufactura aditiva FDM.....</i>	74
Figura 33	<i>Partes del prototipo.....</i>	75
Figura 34	<i>Proceso de funcionamiento del prototipo.....</i>	76
Figura 35	<i>Interfaz HMI de LabView para trabajar remotamente</i>	77
Figura 36	<i>Representación del controlador PID usado.....</i>	78
Figura 37	<i>Esquema de conexión utilizado en el proyecto y prototipado 3D.....</i>	79
Figura 38	<i>Circuito impreso del proyecto.....</i>	80
Figura 39	<i>Proyecto funcionando en una pantalla LCD.....</i>	81
Figura 40	<i>Lazo de control del dispositivo afinador</i>	82
Figura 41	<i>Prototipo construido</i>	83
Figura 42	<i>Relación de las 12 notas musicales y sus octavas con la frecuencia en Hz.....</i>	84
Figura 43	<i>Partes del violín, vista frontal y lateral de todos sus componentes.....</i>	85
Figura 44	<i>Evolución del arco del violín a través de los siglos</i>	86
Figura 45	<i>Distribución de la fuerza en el arco del violín actual diseñado por Tourte.....</i>	86
Figura 46	<i>Clavijas y clavijero del violín.</i>	88
Figura 47	<i>Funcionamiento del sensor de Efecto de Hall y su configuración de pines. ..</i>	89
Figura 48	<i>Funcionamiento de un encoder en su salida digital</i>	90

Figura 49 <i>El modelo en V correspondiente a la norma VDI 2206</i>	91
Figura 50 <i>Cámara de la impresora 3D para imprimir ABS y diferentes tipos de PLA</i>	94
Figura 51 <i>Garra que en su interior posee diferentes tamaños para las diferentes clavijas existentes de violín</i>	95
Figura 52 <i>Formas interiores y garra que sirvió para el cálculo de la fuerza del motor</i> ..	95
Figura 53 <i>Simulación de la carga de las clavijas sobre la garra impresa en 3D</i>	98
Figura 54 <i>Obtención del torque máximo</i>	99
Figura 55 <i>Fórmula del torque</i>	99
Figura 56 <i>Cuadro de rendimiento del Motor Pololu 25D 172:1</i>	102
Figura 57 <i>Rodamiento 6806-2RS FBJ</i>	103
Figura 58 <i>Medición de la fuerza de empuje de las clavijas del violín</i>	104
Figura 59 <i>Ley Acción – Reacción</i>	104
Figura 60 <i>Evolución del prototipo</i>	107
Figura 61 <i>Micrófono Electret MAX 4466</i>	111
Figura 62 <i>Pantalla OLED SH1106</i>	114
Figura 63 <i>Diagrama Esquemático de la PCB</i>	119
Figura 64 <i>Diagrama de Conexión de la PCB. Capa superior e inferior</i>	120
Figura 65 <i>Modelo 3D de la PCB</i>	120
Figura 66 <i>Encontrar el botón Getting Started en la página oficial</i>	121
Figura 67 <i>Paso 1: Primer uso de Teensy</i>	121
Figura 68 <i>Paso 2: La aplicación Teensy Loader</i>	122
Figura 69 <i>Paso 3: Compilador</i>	122
Figura 70 <i>Verificación de instalación de paquetes Teensyduino</i>	123
Figura 71 <i>Carga y prueba de un ejemplo para la teensy 3.2</i>	123
Figura 72 <i>Diagrama de Flujo del Sistema Completo</i>	124

Figura 73	<i>Combinación de dos frecuencias f_2 y f_5</i>	126
Figura 74	<i>Diagrama de flujo de la FFT</i>	128
Figura 75	<i>Curva de ajuste con 128 muestras y tamaño de la muestra de 128</i>	129
Figura 76	<i>Curva de ajuste con 256 muestras y tamaño de la muestra de 256</i>	129
Figura 77	<i>Control Absoluto del motor</i>	130
Figura 78	<i>Diagrama de flujo del controlador del motor</i>	131
Figura 79	<i>Diagrama de flujo del controlador de la FFT - Frecuencia</i>	133
Figura 80	<i>Placa PCB a doble cara fabricada de manera artesanal</i>	134
Figura 81	<i>Placa limpia y cortada</i>	135
Figura 82	<i>Impresión Pistola Afinador con 40% de relleno</i>	138
Figura 83	<i>Impresión Puerta Pistola con 40% de relleno</i>	139
Figura 84	<i>Impresión Garra con 100% de relleno</i>	139
Figura 85	<i>Impresión Tapa Batería con el 20% de relleno</i>	140
Figura 86	<i>Unión Switch On/Off con el afinador</i>	140
Figura 87	<i>Unión Rodamiento con el afinador</i>	141
Figura 88	<i>Unión Acople-Motor con el afinador</i>	141
Figura 89	<i>Ubicación batería del dispositivo en su compartimiento dedicado y botón giro</i>	142
Figura 90	<i>Unión motor lineal a la pistola por medio de tornillos M4x15 sujetos en la parte inferior del prototipo</i>	142
Figura 91	<i>Unión pantalla OLED con el prototipo por medio de 4 tornillos M3x12 con tuerca</i>	143
Figura 92	<i>Afinador automático ensamblado totalmente</i>	144
Figura 93	<i>Diagrama de conexiones</i>	144
Figura 94	<i>Diagrama de conexión a la placa PCB</i>	145

Figura 95 <i>Menú principal – Seleccionar Cuerda</i>	146
Figura 96 <i>Menú ¿Está seguro/a?</i>	146
Figura 97 <i>Menú Controlador</i>	147
Figura 98 <i>Espera de sonido – Sonido menos o más que la frecuencia ideal</i>	147
Figura 99 <i>Frecuencia OK</i>	148
Figura 100 <i>Prueba de la señal del micrófono</i>	149
Figura 101 <i>Esquema de la planta con los controladores</i>	161
Figura 102 <i>Resultado de la afinación sin controlador</i>	162
Figura 103 <i>Resultado de la afinación con controlador</i>	165
Figura 104 <i>Pesaje del dispositivo – 0.556 kilogramos</i>	170

RESUMEN.

Debido a la problemática mundial, estudiar un instrumento vía online ha sido todo un reto, sobre todo resolver la necesidad de una afinación correcta por lo que se diseñó e implementó un afinador automático para violín que sea capaz de mover las clavijas del violín hasta llegar cerca de la frecuencia ideal en hertzios de cada cuerda del instrumento, sin alterar su estructura funcional y que sea aplicable a todos sus tamaños. Todo el trabajo se basó en la norma para sistemas mecatrónicos VDI 2206, dicho prototipo contó con un sistema de captación de sonido de cada cuerda, se adaptó un prototipo lo más pequeño posible y liviano, además, se programó un sistema de control en un microprocesador capaz de dar instrucciones de acuerdo a la frecuencia de entrada y la frecuencia ideal de cada cuerda, por último, se diseñó una interfaz de usuario simple e intuitiva. Se obtuvo un error absoluto promedio de 4.87 ± 2.40 en todas las cuerdas, en la fase de pruebas, con un error máximo de 11.8 hertzios en la cuerda de SOL y un mínimo de 0.1 Hertzios en la cuerda de LA. Las frecuencias por debajo de 200 hertzios, debido a su baja amplitud, captaba su octava superior y sus frecuencias ideales se encontraban más cerca unas a otras. Con este estudio inicial, se planteó reducir el error en estas frecuencias para que la afinación del violín sea más precisa y casi imperceptible al oído humano, reduciendo al máximo, su error de hertzios con respecto a la frecuencia ideal de cada cuerda del violín. Y, finalmente, se recomendó reubicar los botones de la HMI en el mango del prototipo.

Palabras clave:

- **AFINADOR AUTOMÁTICO PARA VIOLÍN**
- **IMPRESIÓN 3D**
- **SISTEMA DE CONTROL**
- **AFINACIÓN DE UN VIOLÍN**
- **TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER EN ARDUINO**

ABSTRACT.

Due to global problems, studying an instrument online has been a challenge, especially solving the need for a correct tuning, which is why an automatic violin tuner was designed and implemented that is capable of moving the violin pegs up to close of the ideal frequency in hertz of each string of the instrument, without altering its functional structure and that is applicable to all its sizes. All the work was based on the standard for mechatronic systems VDI 2206, said prototype had a sound pickup system for each string, the prototype was adapted as small and light as possible, in addition, a control system was programmed on a microprocessor able to give instructions according to the input frequency and the ideal frequency of each string, finally, a simple and intuitive user interface was designed. An average absolute error of 4.87 ± 2.40 was obtained in all the strings, in the testing phase, with a maximum error of 11.8 Hertz in the G string and a minimum of 0.1 Hertz in the A string. Frequencies below 200 hertz, due to their low amplitude, picked up their upper octave and their ideal frequencies were closer to each other. With this initial study, it was proposed to reduce the error in these frequencies so that the tuning of the violin is more precise and almost imperceptible to the human ear, reducing to the maximum, its error of hertz with respect to the ideal frequency of each violin string. And, finally, it was recommended to relocate the buttons on the prototype's grip.

Keywords:

- **AUTOMATIC VIOLIN TUNER**
- **3D PRINT**
- **CONTROL SYSTEM**
- **TUNING A VIOLIN**
- **FFT IN ARDUINO**

Capítulo I: Generalidades

Presentación

La Mecatrónica se ha ido incorporando poco a poco en el proceso de aprendizaje musical, surgiendo como una necesidad de las personas por aprender este bello arte, es el caso de la tesis de Perú, en el que implementan la impresión braille de partituras para personas no videntes, como la tinta y el papel es para los videntes, el braille y la mecanografía es para las personas no videntes. Debido a la complejidad de identificar notas en el piano sin ver se estudia la posibilidad de hacer estas partituras con el uso de un punzón, sensores y un microcontrolador para programar todo el proceso de imprimir una partitura en braille. (Espinoza del Castillo, 2020)

La afinación de instrumentos musicales siempre ha conllevado un reto para todos los músicos, debido una mala construcción inicial del instrumento o por no haber desarrollado aún el oído musical para poder identificar las frecuencias correctas de las notas por lo que conlleva a un gasto considerable de cuerdas y repuestos, y por último, una frustración general con el instrumento de aprendizaje, generalmente es muy común en los instrumentos de cuerdas, como guitarra, violín, viola, y chelo. Los instrumentos de vientos tienen una bomba general de afinación por lo que tienen otro proceso de afinación que no abordaremos en el presente trabajo de investigación.

La afinación de un instrumento musical, específicamente de los instrumentos de cuerdas, es fundamental para el aprendizaje del mismo y también, del nuevo músico, que está desarrollándose, ya que si no se afina correctamente desde que se empieza a estudiar, es difícil volver a acostumbrar el oído a las notas y su frecuencia correcta, por lo que es necesario una solución para facilitar el proceso de aprendizaje inicial y evitar

el lamentable resultado del 40% de los estudiantes de violín cuando inician, es decir, la frustración, la desmotivación y práctica del instrumento.

Por estas y varias razones más como el confinamiento debido a la pandemia mundial, cuyas clases de instrumento se han convertido de manera online, es necesario, realizar un prototipo funcional que resuelva este problema muy recurrente en clases virtuales y en estos tiempos de incertidumbre.

Definición del Problema

En el mundo entero sucede muy a menudo que el instrumento a practicar o que está en proceso de aprendizaje esté desafinado, especialmente los instrumentos de cuerdas pulsadas, como la guitarra o el violín se desafinan constantemente al ser instrumentos nuevos o por la falta de práctica constante, por lo que se pierde entusiasmo y motivación al momento de aprender dichos instrumentos.

(Carrión, 2018) respecto a la afinación afirma que aquellas frecuencias que están en su valor correcto, según el sistema mundial de afinación, se encuentra afinado refiriéndose a la nota musical o sonido a analizar.

En América latina sucede que existen afinadores automáticos para guitarra, portátiles como la marca (YuekoT2, 2018) o la (roadiemusic, 2021) que actualmente venden la tercera versión del dispositivo y de bajos por separado, es una empresa de Estados Unidos que trabajan con envíos a toda América Latina con un precio aproximado de \$ 250 USD; por otra parte existen incorporados en la misma guitarra como es el caso de (Gibson, 2013) que viene incorporada al propio instrumento para afinar con sus fortalezas y debilidades como tener cuerdas especiales y un cambio de cuerdas especial.

No existe aún en América Latina afinadores automáticos para violín, siendo una facilidad para mejorar considerablemente el aprendizaje inicial y medio de este instrumento y teniendo la afinación de las cuerdas del violín en sus respectivas frecuencias sonoras. En todos los países latinoamericanos se ha optado por las clases en línea debido a la pandemia mundial por lo que los estudiantes nuevos de violín tienen que saber afinar sus instrumentos en casa, en muchos casos con la ayuda de sus padres, para la clase virtual o durante la clase de violín por lo que se pierde gran tiempo de la clase en esta situación.

En el Ecuador no es la excepción, donde muchos alumnos nuevos de violín han dejado de estudiar y practicar por presentar este problema de no poder afinar su instrumento ellos mismos en casa y por el momento, dificultando considerablemente el estudio en casa.

Actualmente, no existen afinadores automáticos para violín en toda Latinoamérica y en el mundo existen prototipos diversos para guitarra pero para violín aún no existe un modelo específico, el proceso de afinación de la guitarra con el violín es similar pero no es lo mismo, la guitarra maneja frecuencias más bajas por lo tanto son tensiones mucho más bajas comparadas con las tensiones del violín, por otra parte, el mecanismo de afinación de la guitarra posee un tornillo sin fin y corona por lo que su movimiento se hace mucho más despacio y suave, a comparación con el violín que usa únicamente rozamiento estático en las clavijas y su movimiento es tosco y muy rápido, incluso en violines más pequeños la afinación se complica porque los movimientos son mucho más significativos y afectan mucho a la afinación de la cuerda, por lo que ajustar demasiada la cuerda conlleva al rompimiento de la misma.

Anteriormente los estudiantes nuevos de violín contaban con la ayuda de sus profesores particulares de instrumento y ellos afinaban los instrumentos cada clase por

lo que el nuevo estudiante solamente cogía el instrumento ya afinado, ahora con la nueva actualidad, esto se vuelve imposible y poco práctico, por lo que se ven afectados económicamente al momento de aprender a afinar por primera vez, ya que no se tiene claro el proceso de afinación al comenzar a practicar un nuevo instrumento y por ende, conlleva a dejar de estudiar el violín y el proceso de aprendizaje termina por frustrar al estudiante e incluso “odiar” la música por el simple hecho de no poder afinar el violín.

Justificación e Importancia

En el contexto del uso de un instrumento musical de cuerda, especialmente en el violín, presenta el problema de lograr una afinación correcta. Primero por su mecánica de afinar que es a presión y rozamiento estático el que mantiene la afinación correcta, y segundo; dado que son notas con frecuencias relativamente altas, el oído tarda en acostumbrarse a esas vibraciones producidas por la cuerda, lo que comúnmente pasa es que principiantes del violín rompen las cuerdas por tensarla demasiado, lo que provoca que el alumno o estudiante de música tenga miedo de afinar de nuevo el violín, puesto que al romperse la cuerda, salta de una forma precipitada que incluso hay casos en los que lastima al músico. Éstos y muchos otros casos son razones por las cuales muchos músicos en crecimiento dejan de estudiar el violín, porque necesitan de un maestro que les afine el violín y dejan de lado esta profesión y entretenimiento muy enriquecedor en varios aspectos de la vida de un ser humano.

Con respecto a éstos proyectos que solucionan el aprendizaje del violín hay muchos, pero exclusivamente de la afinación no existe ninguno que facilite su aprendizaje, por eso la importancia de implementar objetos electrónicos automatizados y de tamaño relativamente pequeños es lo que conlleva a una mejor calidad de vida, sin dejar de lado las tradiciones y costumbres, puesto que la automatización no es dejar de

lado el trabajo del ser humano, más bien ser un soporte y ayuda para ahorrar tiempo y aumentar la eficiencia en todo campo de producción.

Es común ver en casi todos los conservatorios y centros de música el mismo problema: afinar correctamente el violín, por lo que he decidido dedicar mi conocimiento básico en automatización para resolver este gran problema, causante de varias frustraciones y tiempo mal gastado en buscar ayuda para afinar su propio instrumento musical.

El presente estudio recopila información de varios autores acerca del origen de la afinación musical y cuáles son las frecuencias correctas al momento de tocar el instrumento. Además, resuelve el problema de la afinación de cuerdas de varias generaciones pasadas que han pasado por lo mismo, para que, a medida de lo posible, no vuelva a ser un obstáculo para el aprendizaje del instrumento y conlleve a formar muchos más músicos y artistas en el país de manera muy práctica.

De igual manera presenta una justificación económica puesto que previene y soluciona el gasto inmensurable de cuerdas rotas por la mala práctica de afinación o por intentar afinar el instrumento sin ninguna indicación previa o conocimiento sobre las notas adecuadas y sus frecuencias ideales. Además, que los padres recuperan el capital invertido inicialmente porque su hijo o hija siga estudiando el instrumento y no lo guarde o lo venda a mucho menor precio del que se adquirió.

Se trabaja con familias de instrumentistas jóvenes que están iniciando en la Ciudad de Ambato que desconocen lo que es la afinación del violín y como se logra una correcta afinación de las cuerdas para la práctica constante en casa y de gran distracción y alivio para los niños y jóvenes del colegio de artes "Bolívar" que en medio de esta crisis puedan dejar de pensar en toda esta pandemia y estrés que conlleva esta

situación, evitando considerablemente los casos de suicidios que han ido en aumento debido al confinamiento, justificando la parte social del proyecto.

También cuenta con una justificación metodológica porque se está aportando con el prototipo de afinador automático de violín, siguiendo los criterios de diseño según la norma VDI 2221 para el desarrollo de proyectos y selección de componentes ideales para la construcción de un dispositivo que solucione en gran medida al problema presentado que es el no poder afinar correctamente las cuerdas del violín.

También con una justificación legal, la innovación y emprendimiento si cuenta con normas, políticas y reglamentos. Lo que dará como resultado nuevas fuentes de empleo, por lo que el dispositivo, si llegara a hacer factible su venta y distribución, ayudaría enormemente a todos aquellos alumnos dispuestos a aprender un nuevo instrumento musical cuya educación es respaldada por "*La Ley Orgánica De Educación Intercultural Del Ecuador*", (2017).

La investigación presente ayudará a tener más información sobre el desarrollo de prototipos que ayuden al desarrollo cultural que tanta falta nos hace en el país y que sería de gran ayuda para todos aquellos músicos profesionales y no profesionales su uso diario reduciendo horas de ensayo y errores humanos que se comenten al momento de ofrecer un espectáculo o presentación.

Área de Influencia

El prototipo de un afinador automático para violín, impacta directamente en la docencia musical de todo tipo de conservatorios y escuelas de música, inclusive en la docencia personalizada para facilitar el proceso de aprendizaje del instrumento, sin alterar su estructura funcional, es decir, sin someter al instrumento a un cambio de arquitectura para que se pueda afinar automáticamente, haciendo este prototipo muy útil para usarlo en varios violines, por ejemplo, en una orquesta de estudio como ayuda

y soporte, puesto que los concertinos o alumnos más avanzados siempre ayudan a afinar a los más pequeños o nuevos alumnos de la orquesta, ahorrando muchísimo tiempo de ensayo y concentrándose en tocar, también se vería afectado la economía de los padres y del estudiante por ya no gastar en cuerdas musicales que por el proceso de afinación es una de las razones más comunes por las que se rompen las cuerdas del violín.

Alcance General del Proyecto De Investigación

Esta investigación tiene un alcance social ya que para alcanzar los objetivos y responder a las hipótesis se realizará una prueba del dispositivo a una muestra de 7 familias.

Se realizará la prueba del dispositivo a 7 familias que forman parte de la comunidad estudiantil del colegio de artes “Bolívar”, el mismo que se encuentra ubicado en la ciudad de Ambato- Ecuador.

En cuanto al alcance temporal la tesis tuvo 12 meses de elaboración desde su aprobación del mes de agosto 2020.

Limitaciones

Una de las limitaciones más importantes para realizar este proyecto de investigación ha sido la falta de bibliografía sobre prototipos de afinadores automáticos de violines, existen investigaciones sobre afinadores automáticos para guitarra, pero su mecanismo de afinación es completamente diferente. Sin embargo, el objetivo es casi el mismo, ajustar y desajustar una cuerda, aunque en el violín las tensiones son mucho mayores que en la guitarra.

Otra limitación ha sido la muestra de 7 estudiantes del colegio de artes y no puede generalizarse en otros ámbitos, además, que todos tenían que pedir autorización

de los padres y su presencia al momento de realizar la prueba del experimento lo que conllevó a una mayor cantidad de tiempo invertido con respecto a lo planeado, por temor alguno al funcionamiento del experimento.

La limitación más evidente fue la pandemia mundial que atravesamos porque de cierta manera la adquisición de sensores y componentes se retrasan aún más de lo esperado, y al momento de realizar las pruebas con los alumnos del colegio de artes se debió tener todas las medidas de bioseguridad para evitar cualquier inconveniente de salud, puesto que las pruebas del experimento se realizaron de forma individual en el hogar de cada alumno.

Debido a estas razones, se invita a otros apasionados de la música y de la investigación a profundizar el desarrollo de estos dispositivos automáticos que ayudaría inmensamente al desarrollo musical y cultural del país.

Consideraciones Éticas

Este estudio respetará las normas éticas sobre la confidencialidad de datos de las personas que colaboraron en la ejecución del presente proyecto, todos los niños menores de edad con la aceptación previa de sus padres, respetando sus creencias religiosas e ideológicas.

Así mismo se evitará todo tipo de plagio, citando a cada autor o autores que dedicaron su investigación a las variables que se ha considerado en el presente trabajo, para ello se aplicará las normas APA (American Psychological Association) 7ma edición vigente.

Viabilidad del estudio

Este estudio es viable en la medida que se pudo lograr las autorizaciones y permisos respectivos otorgados por el rector del colegio de artes y los padres de familia para ingresar a los hogares de los alumnos de violín en la ciudad de Ambato y hacer las pruebas respectivas del prototipo para verificar su funcionamiento y eficiencia al momento de afinar el instrumento con la muestra de 7 alumnos en el menor tiempo posible.

Motivación del estudio

Hoy existen soluciones electrónicas para ayudar a un músico a afinar su instrumento musical, se los encuentra en todas las casas musicales y tiendas relacionadas. Sin embargo, estos dispositivos entregan una referencia al usuario de desafinación, lo que posteriormente el usuario procede a afinar manualmente el instrumento.

Se pretende no solo cumplir la función de identificar la nota musical, sino de ajustar o desajustar la cuerda según como corresponda y así el usuario no interviene si no sólo en tocar el instrumento, como si de un profesor se tratara. Y además que lo puede hacer de manera personal y poco a poco ir aprendiendo a afinar el instrumento por sí solo que es el objetivo secundario del presente proyecto.

En la actualidad que estamos viviendo es imposible dar clases presenciales por lo que se ha optado por clases online en plataformas virtuales como zoom, Google meets, entre otras. Lo que dificulta mucho más el trabajo del maestro al momento de enseñar el violín y ocasionando frustraciones en los estudiantes porque se pierde tiempo y dinero en afinar el violín vía online. Esto me ha motivado a ver que es una necesidad urgente y muy útil para los primeros pasos de este maravilloso instrumento.

Gracias a una entrevista realizada con un maestro del colegio de artes “Bolívar”, Byron O., supo manifestarse que ha sido todo un reto el cambio de clases presenciales a online, debido a que para un mejor aprendizaje siempre debe haber un acercamiento directo con el instrumento y el maestro, cosa que actualmente es imposible. Otro de los aspectos que mencionaba es que la afinación es indispensable a la hora de la práctica y que la falta del mismo es fatal en el aprendizaje por lo que ha optado por ir a la casa del estudiante a afinar su instrumento o viceversa, y en algunos casos ha suspendido la clase práctica para solamente realizar un refuerzo teórico del instrumento, algo que justificaría de alguna manera la hora-clase pero que no sería lo ideal. Por otro lado, comentó que a un estudiante regular y constante le toma de 3 a 4 años en aprender a afinar el violín.

Por último, argumentó que el dispositivo mecánico es algo novedoso y que no sabía de la existencia de los mismos en toda su trayectoria musical que lleva, aproximadamente, 40 años, y que el tiempo y energía que ahorraría para dar clases y para el aprendizaje musical se reduciría considerablemente, dando grandes beneficios tanto para el maestro como para el alumno. Invertiría un valor de \$20 a \$30 USD.

Objetivos

Objetivo General

Diseñar e implementar un prototipo de afinador automático para violín universal para mejorar la afinación de las cuerdas del instrumento sin alterar su arquitectura funcional ahorrando dinero y tiempo al momento de practicar el instrumento en casa o en una orquesta.

Objetivos Específicos

- Describir la afinación de las cuerdas en violines de estudiantes del colegio de artes “Bolívar” antes de la aplicación del afinador automático.
- Diseñar un sistema de adquisición de datos funcional y optimizado para reducir considerablemente el tiempo de afinación.
- Diseñar un sistema de control capaz de disminuir sobre picos y reducir al máximo el tiempo de calibración.
- Diseñar una interfaz amigable con el usuario que sea capaz de ser programada por niños para afinar su propio instrumento.
- Conseguir reducir al máximo el tamaño del prototipo para que sea portable y precio del prototipo para que sea accesible para la gran mayoría de alumnos nuevos en este instrumento.
- Diseñar un mecanismo que no se rompa por la fuerza y que sea capaz de afinar todos los tamaños de violín que existen actualmente en el mercado ecuatoriano.
- Implementar un código para optimizar al máximo la FFT que realizará el microprocesador ARM Cortex de 32 bit y mandar los comandos necesarios y específicos para la cuerda, ya que cada cuerda tiene su respectiva frecuencia deseada (Set Point), que deberá ser elegida antes de afinar cualquier cuerda.
- Describir la afinación de las cuerdas en violines de estudiantes del colegio de artes “Bolívar” después de la aplicación del afinador automático.

Alcance del Proyecto

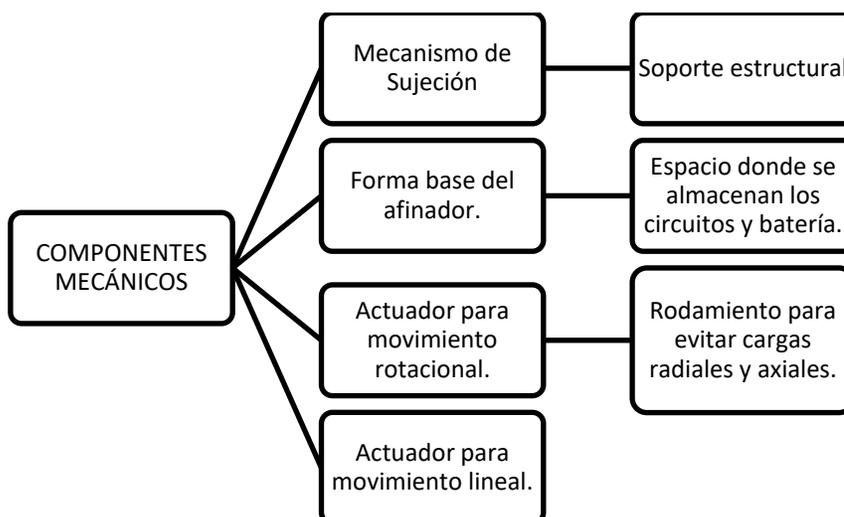
Componentes Mecánicos

Se presentan los componentes del subsistema mecánico, tomando el modelo de los afinadores automáticos de guitarra y adaptados de la mejor manera posible en el violín, que se puede observar de mejor manera en la **Figura 1**.

- Pinzas de sujeción: Se lo realiza en impresión 3D por su complejidad de formas y debido a que debe tener una resistencia alta para que no se rompa al momento de afinar el violín.
- Forma base del afinador y soporte de baterías: Diseñado con la ergonomía de una pistola de juguete para Wii, se diseñó para adaptarlo al funcionamiento del afinador automático. Tratando de reducir su tamaño para que sea lo más portable posible, limitándose al tamaño de los motores y de los componentes electrónicos, incluido el espacio para la batería a utilizar.
- Mecanismo de movilidad: Motor a escobillas que girará las clavijas del instrumento ya sea en un sentido horario o antihorario según corresponda.
- Actuador: Motor lineal que servirá para meter o sacar la clavija del violín de la marca Actuonix que posee en su interior un tren de engranajes y un torque de 4 Kgf.

Figura 1

Componentes Mecánicos



Nota. Esta figura representa el alcance del proyecto, describiendo la parte mecánica del sistema.

Componentes Electrónicos/Eléctricos

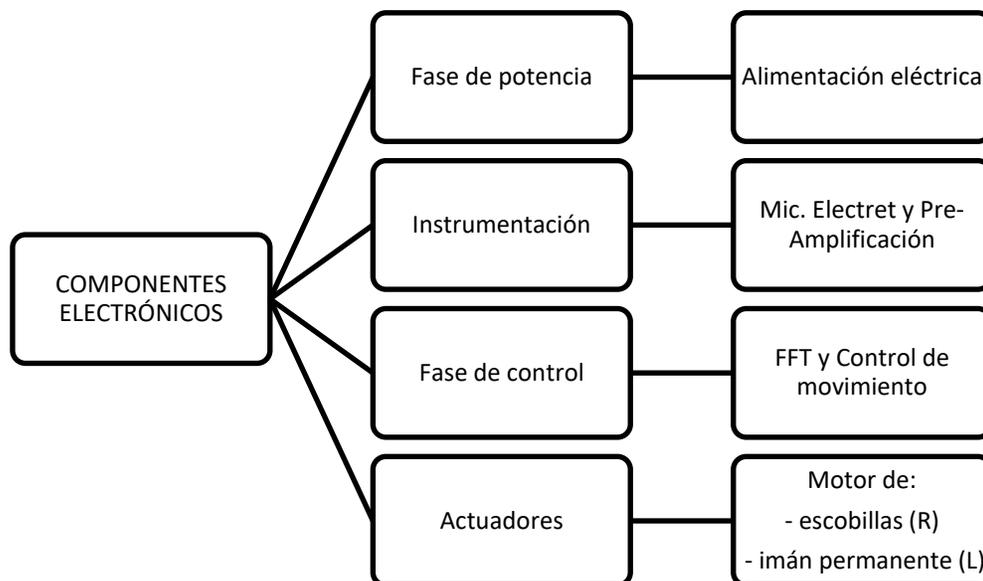
Se presentan las partes que componen la parte electrónica del proyecto, como es el microprocesador, drivers, acondicionadores, sensor de sonido, reguladores de voltaje, los botones, leds y pantalla para la comunicación con el usuario o la llamada interfaz HMI, por último, se encuentra el diseño de la placa electrónica para la respectiva PCB del prototipo.

Los componentes del sistema electrónico y eléctrico del afinador automático son los siguientes: **Figura 2**

- Fase de Potencia: subsistema que alimenta a los componentes del movimiento principal de rotar la clavija y apretarla
- Fase de control: subsistema que controla las acciones de los actuadores y del mecanismo de movilización.
- Actuadores: subsistema que se encarga de la movilización dotado con motor de escobillas para el movimiento rotacional, y un actuador lineal con motor de imán permanente.
- Sensores: subsistema que consta de un micrófono de condensador electreto con preamplificación incluida, utilizado para captar el sonido de la cuerda que, mediante una FFT, consigue su frecuencia fundamental y es procesado por el microcontrolador en este caso una Teensy 3.2, el mismo que manda una orden de si afina la cuerda (Mov. Horario y apretar) o si desafina la cuerda (Mov. Antihorario y aflojar).

Figura 2

Componentes eléctricos / electrónicos



Nota. Esta figura representa el alcance del proyecto, describiendo la parte eléctrica del sistema.

Componentes del Sistema de control

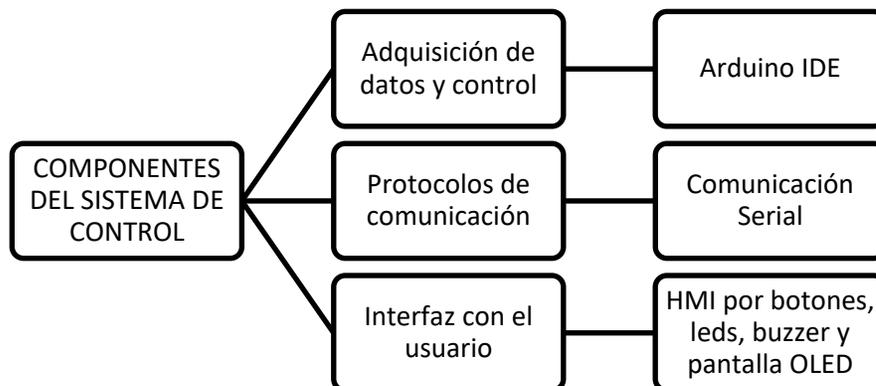
Se presenta la programación del prototipo, donde se encuentra la FFT, la programación del menú, los botones, buzzer y leds que servirán de comunicación con el usuario.

Se puede observar en la **Figura 3** el software y sistema de control que se implementara en el subsistema. Los componentes del sistema son los siguientes:

- ARDUINO IDE para programar el controlador y la FFT
- Sistema operativo Windows.
- Compilador Teensy.

Figura 3

Componentes del Sistema de Control



Nota. Esta figura representa el alcance del proyecto, describiendo la parte del sistema de control.

Dentro de la implementación del HMI, se podrá tener las funciones que se pueden observar en la **Tabla 1**

Explicativa de las funciones que permite la interfaz HMI implementada:

Tabla 1

Explicativa de las funciones que permite la interfaz HMI implementada

Función	Descripción
On/Off	Interruptor que prende y apaga el dispositivo, para ahorrar batería y reiniciar el equipo.
Botón Izquierdo (Desplazamiento/Opción)	Botón que ayuda a desplazarse en el menú implementado.
Botón Derecho (Start/Aceptar)	Selecciona la opción y entra al submenú previamente seleccionado.

Función	Descripción
Botón en el mango de la pistola (giro)	Botón que ayuda a cuadrar las garras de ajuste a la posición de la clavija.
Led Rojo Izquierda (-)	Indicador luminoso para indicar que la afinación se encuentra por debajo de la ideal.
Led Rojo Derecha (+)	Indicador luminoso para indicar que la afinación se encuentra por encima de la ideal.
Led Azul (OK)	Indicador luminoso para indicar que la afinación se encuentra correcta e igual que la ideal.
Pantalla OLED	Visualización del menú y submenús que visualizará el usuario para seleccionar la cuerda correspondiente.

Nota. Esta tabla muestra las diferentes funciones del sistema implementado para comunicación con el usuario.

Software para Implementación, análisis y simulación

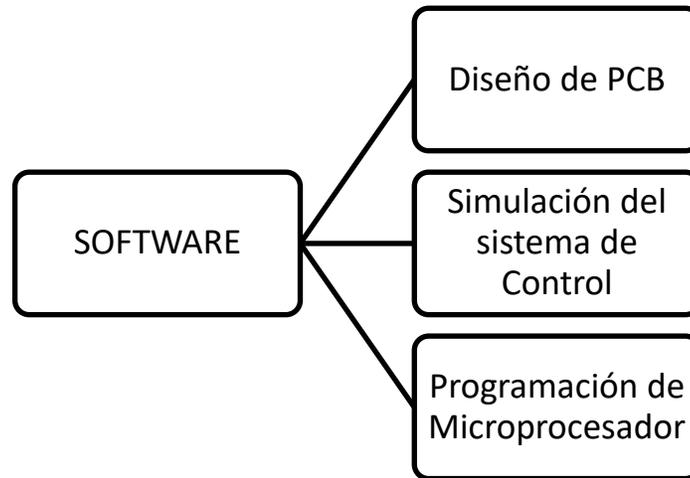
- Software de diseño de PCB.
- Software para programación del microcontrolador.
- Software de implementación del sistema de control.

En la **Figura 4**

Componentes de Software, simulación e implementación, se detallan los componentes de software:

Figura 4

Componentes de Software, simulación e implementación



Nota. Esta figura representa el alcance del proyecto, describiendo la parte de software y simulación del sistema

Subsistema de Obtención de la Frecuencia y Control

En la **Figura 5**

Subsistema de Obtención de la Frecuencia y Control, se presenta un esquema de la obtención de la frecuencia y su control en los actuadores:

- **Amplificación y Filtro de la Señal:** se encarga de captar la señal dada por el micrófono, la señal pasa por un amplificador y filtros para una mejor adquisición de la señal.
- **Adquisición Analógica y FFT:** Adquiere la información del sensor y mediante el microprocesador ARM Cortex de 32 bits transforma la señal en Hz y la compara de acuerdo a la cuerda preestablecida.
- **Comparación en Hz y señales de envío:** Compara los Hz obtenidos con el Set Point y manda comandos de acción a los mecanismos de accionamiento y vuelve a medir hasta conseguir el Set Point deseado.

Figura 5*Subsistema de Obtención de la Frecuencia y Control*

Nota. Esta figura representa el alcance del proyecto, describiendo la parte del subsistema de Obtención de la Frecuencia y Control.

Subsistema de Giro y Avance

El subsistema cuenta con dos motores, uno correspondiente al giro de la clavija y otro al empuje de la clavija de una forma lineal debido a que la clavija de un violín se encuentra solamente a fricción con un alto coeficiente de rozamiento estático que con mucha frecuencia se suelta, desafinando totalmente la cuerda.

Estructura del Documento

El presente trabajo de titulación consta de 5 capítulos, basados en la norma de diseño VDI 2206, la cual se utiliza para la realización de proyectos mecatrónicos, en estos capítulos se detallará la investigación, la implementación y, al final, las conclusiones y respuesta que obtuvo el prototipo a las diferentes pruebas de funcionamiento.

El capítulo 1, generalidades, se definió el problema presentado por múltiples alumnos en el transcurso de mi carrera musical como docente y escuchando el problema de varios alumnos de nivel inicial y medio, se realizó la justificación y se definieron las áreas de ingeniería que abarcara el proyecto para desarrollar una solución, además en este capítulo se ha delimitado la magnitud del proyecto planteándome los resultados que deseo obtener además de plantear el alcance que tiene el proyecto.

El capítulo 2, marco teórico, se especifica los procesos de afinación de los instrumentos de cuerda, métodos de afinación, además se incluye la investigación acerca de los diferentes tipos de afinadores que existe en el mercado para los instrumentos de cuerda, así como las maneras más eficientes de obtener una afinación correcta, en este capítulo se encuentra toda la información para desarrollar los objetivos planteados en el capítulo 1.

El diseño mecatrónico se encuentra descrito en el capítulo 3, según la recomendación de la Norma VDI 2206 encontramos el diseño del sistema, el diseño de dominio específico y concluyendo con la integración de estos.

En el capítulo 4 se encuentra descrito a detalle las pruebas y resultados de los subsistemas eléctricos, mecánicos y del sistema integrado como tal.

Para concluir, en el capítulo 5, se encuentran las Conclusiones y Recomendaciones de este trabajo de titulación.

Capítulo II: Marco Teórico

El sonido

Gonçalves Molina (2020) describe de una manera física como se produce el sonido en el ambiente o llamado también medio elástico como una vibración, en este caso, el aire. Agrega también otra definición del “sonido: es la sensación producida en el oído por la vibración de las partículas que se desplazan en forma de onda sonora”. Y, por último, afirma que siempre debe existir “un cuerpo vibrante, llamado foco, que puede ser una cuerda tensa, varilla o lengüeta”. (p.9)

Para tener una idea más clara sobre la propagación de las ondas sobre el medio elástico, en este caso aire, se asemeja a la una unión de resortes como en la **Figura 6**:

Figura 6

Símil mecánico de una onda sonora.



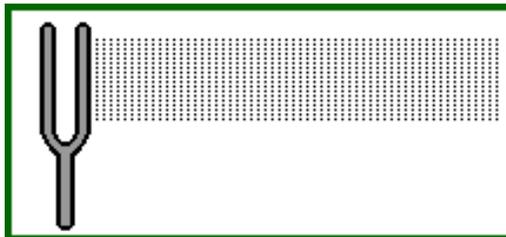
Nota. Recuperado de, www.lpi.tel.uva.es, 2016.

Gonçalves Molina (2020) además argumenta lo siguiente: Como consecuencia de la vibración de la primera masa, las que se encuentra en **Figura 7**

Vibración de las ondas partiendo de un foco, se mueven “oscilando hacia adelante y hacia atrás, una tras otra, formándose una onda que se mueve a lo largo de la cadena de masas y muelles”. (p. 10)

Figura 7

Vibración de las ondas partiendo de un foco



Nota. Recuperado de, www.lpi.tel.uva.es, 2016.

Por otra parte, en la investigación de Jaramillo (2007) argumenta lo siguiente: “el sonido es una pequeña alteración de la presión atmosférica producida por la oscilación de partículas”, muy acorde a la definición de Molina (2020), que la forma de transmisión es de forma longitudinal, por consiguiente, produciendo la sensación auditiva.

Concluyendo con esto que: el sonido está formado por dos sujetos, el que produce el sonido y el que lo escucha o auditivo. (p. 20)

Gonçalves Molina (2020) termina concluyendo que “cuando un foco vibra en el aire, obliga a que las partículas de ese medio entren a su vez en vibración, siempre con cierto retraso con respecto a las anteriores”. (p. 12)

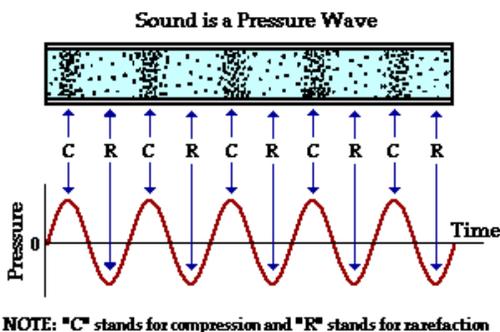
El recorrido del sonido se compone principalmente en dos:

- **Las compresiones** cuando se van acercándose poco a poco entre las mismas partículas.
- **Las dilataciones** donde las partículas estarán más separadas entre sí.

En la **Figura 8**, se representa lo anteriormente mencionado:

Figura 8

Proyección del sonido en un medio



Nota. Recuperado de, www.lpi.tel.uva.es, 2016.

A diferencia del ruido que de igual manera es un sonido repetitivo que se desplaza por un medio elástico, éste no es periódico por lo que causa malestar al oído humano y una sensación desagradable. (Gonçalves Molina, 2020, p. 9)

Cualidades del sonido

Existen principalmente cuatro cualidades bien definidas: el tono o altura, duración, el timbre o sonido y la intensidad o volumen. Estas cuatro características se entrelazan a cuatro fenómenos físicos que son: la frecuencia en hertzios o cents, el periodo o tiempo de duración de la onda, la amplitud de la onda y, por supuesto, los diferentes armónicos que posee la onda, lo que da su timbre característico a cada instrumento o frecuencia de sonido. (Gonçalves Molina, 2020, p. 11)

La altura o tono

Como lo afirma Gonçalves Molina (2020):

“Los sonidos musicales son producidos por algunos procesos físicos como, por ejemplo, una cuerda vibrando, el aire en el interior de un instrumento de viento, etc. La característica más fundamental de esos sonidos es su

elevación, llamado también, altura o cantidad de veces que vibra por segundo, es decir, su frecuencia”. (p. 9)

La unidad de medida de la frecuencia es los llamados ciclos por segundo y en abreviatura Hertzios (Hz), es decir que cuando una nota es muy aguda, existe mayor número de oscilaciones y cuando la nota es grave, este número baja.

Desde el punto de vista de Gonçalves Molina (2020), define el tono como: “Una cualidad que viene determinada por la frecuencia, permite distinguir si un sonido es agudo o grave.

La función de un tono puro corresponde a la de una onda senoidal, donde f es la frecuencia, t es el tiempo y A es la amplitud” (p. 12), definida en la ecuación [1] de la siguiente manera:

$$f(t) = A \sin(2\pi ft) \quad [1]$$

A continuación, en la **Figura 9**, se observa la relación de las frecuencias con la altura de la nota.

Figura 9

Relación de las 12 notas musicales y sus octavas con la frecuencia en Hz

		Frecuencia (en Hertzios) de las notas musicales SIN TEMPERAMENTO								
		0	1	2	3	4	5	6	7	8
n=1	do		32.7	65.41	130.81	261.63 264	523.25 528	1046.50	2093.00	4186.01
n=2	do#		34.65	69.30	138.59	277.18	554.37	1108.73	2217.46	4434.92
n=3	re		36.71	73.42	146.83	293.66 297	587.33	1174.66	2349.32	4698.64
n=4	re#		38.89	77.78	155.56	311.13	622.25	1244.51	2489.02	4978.03
n=5	mi		41.2	82.41	164.81	329.63 330	659.26	1318.51	2637.02	5274.04
n=6	fa	21.826	43.65	87.31	174.61	349.23 352	698.46	1396.91	2793.83	5587.65
n=7	fa#	23.125	46.25	92.50	185.00	369.99	739.99	1479.98	2959.96	5919.91
n=8	sol	24.50	49.00	98.00	196.00	392.00 396	783.99	1567.98	3135.96	6271.93
n=9	sol#	25.96	51.91	103.83	207.65	415.30	830.61	1661.22	3322.44	
n=10	la	27.50	55.00	110.00	220.00	440.00 440	880.00	1760.00	3520.00	
n=11	la#	29.14	58.27	116.54	233.08	466.00	932.33	1864.66	3729.31	
n=12	si	30.87	61.74	123.47	246.94	493.88 495	987.77	1975.53	3951.07	

Nota. Recuperado de, <http://www.historiadelasinfonia.es/>, 2016.

Duración o Tiempo de sonido

Otra de las grandes cualidades del sonido es la duración del sonido, el cuál puede ser largo o corto, concuerdo mucho con la definición de Esteve-Faubel et al. (2009) sugiere que la duración “Depende de la voluntad del emisor y de las condiciones de reverberación de la sala” (p. 17), por lo tanto, queda claro que un sonido se apaga o deja de sonar cuando dicho sonido haya “desaparecido” del ambiente o que los decibeles de audición sean muy pequeños e imperceptibles para el oído humano.

Intensidad

La intensidad es la encargada de aumentar o disminuir la distancia que se oye un sonido, cuya relación física está dada por “flujo medio de energía por unidad de área perpendicular a la dirección de propagación.” (Gonçalves Molina, 2020, p. 11)

Otro concepto muy acertado del mismo autor menciona que “La intensidad de sonido consiste en la cantidad de energía acústica que contiene un sonido”. (p.11)

Se define como la misma fórmula física de la presión, que es fuerza sobre área, pero en este caso, la Fuerza está definida por la amplitud de las vibraciones (P) y el área cuadrada normal al origen de esta onda sonora (A), tal como se muestra en la ecuación [2]:

$$Intensidad = \frac{P}{Area} \quad [2]$$

“Según el S.I. su unidad es el vatio por metro cuadrado [W/m^2], donde P es la potencia medida en Vatios y A es el área de origen del sonido.

Las personas poseen un umbral de audición el cual va desde los 10^{-12} [W/m^2], cuando esta unidad supera el 1 [W/m^2], la escucha se vuelve insoportable y dolorosa.

Debido a los grandes intervalos de valores que existen en la escala lineal, se utiliza una escala logarítmica, cuya unidad es el decibelio definido por la ecuación [3]: (Gonçalves Molina, 2020, p.11)

$$B_{dB} = 10 \log_{10} \frac{I}{I_0} \quad [3]$$

Otra aseveración que realiza Gonçalves Molina (2020) sobre las percepciones del oído humano es la siguiente:

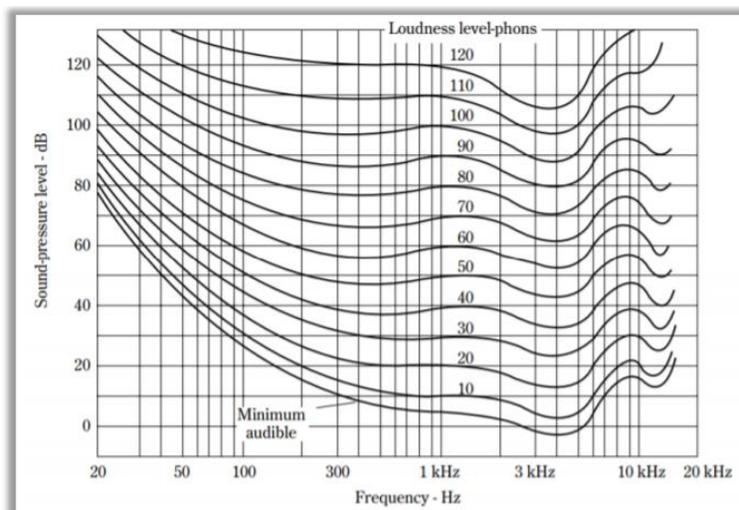
“Está demostrado que la sonoridad percibida varía según la frecuencia y el nivel de intensidad sonora. Los primeros en trabajar en ello fueron Fletcher y Munson en los Laboratorios Bell en 1933, las investigaciones siguieron hasta que se adoptó como standard internacional (I.S.O 226) las curvas isofónicas estudiadas por Robinson y Dadson”. (p. 11-12)

A continuación, en la **Figura 10**, Gonçalves Molina (2020) nos aclara que:

“Las curvas isofónicas se vuelven más planas mientras aumenta la intensidad, es decir, la dependencia de la frecuencia es más relevante cuando hay niveles bajos de intensidad. El oído humano tiene menos sensibilidad para las notas de bajas frecuencias que para las medias y altas”. (p. 11-12)

Figura 10

Curvas Isofónicas Calculadas Por Robinson Y Dadson (I.S.O 226)



Nota. Recuperado de, *Gonçalves Molina, 2020.*

Estas curvas de medición nos demuestran que el oído humano no puede percibir frecuencias bajas a decibeles bajos, el mínimo audible es a partir de 320 hz a un decibel de 10, si se desea escuchar frecuencias bajas se debería aumentar los decibeles a partir de 80, así y solo así se lograría captar el sonido producido.

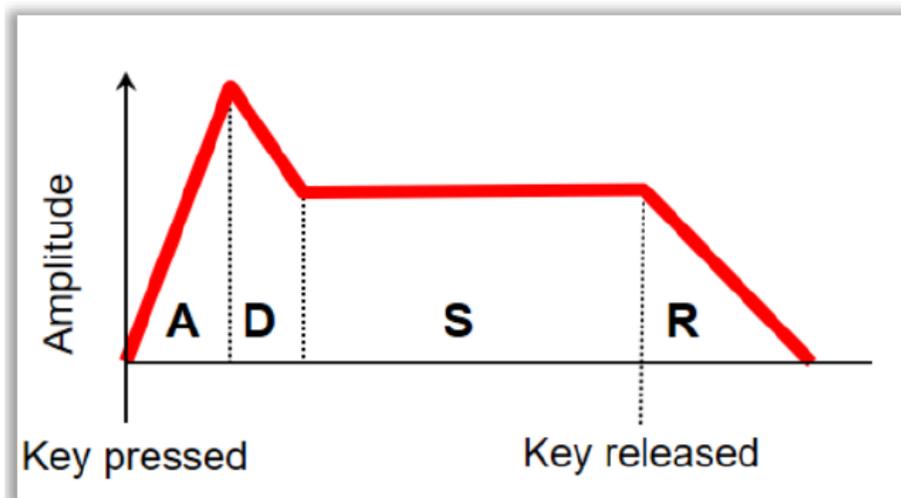
Timbre

Cualidad que ayuda a distinguir los sonidos de los múltiples instrumentos musicales, así se toque la misma altura, intensidad y duración, su timbre será diferente, así como cuando reconocemos la voz de nuestros familiares, se distinguen como suenan los instrumentos unos de otros y todo esto es gracias a la generación de armónicos que cada instrumento musical tiene y de la voz humana también. Tal como lo dice Gonçalves Molina (2020):

“La forma de la onda sonora en el tiempo influye de manera importante en el timbre. Cada instrumento musical tiene una forma de onda característica y por la naturaleza de éstos se puede describir mediante un modelo llamado ADSR. La ADSR consiste en una envolvente de cuatro etapas: ataque (A), decaimiento (D), sostenimiento (S) y relajación (R), tal como se observa en la **Figura 11**”. (p. 15)

Figura 11

Envolvente ADSR



Nota. Recuperado de, *Gonçalves Molina*, 2020, p. 20.

Gonçalves Molina (2020) resume las iniciales mostradas en la **Figura 11**, en la

Tabla 2:

Tabla 2*Iniciales ADSR*

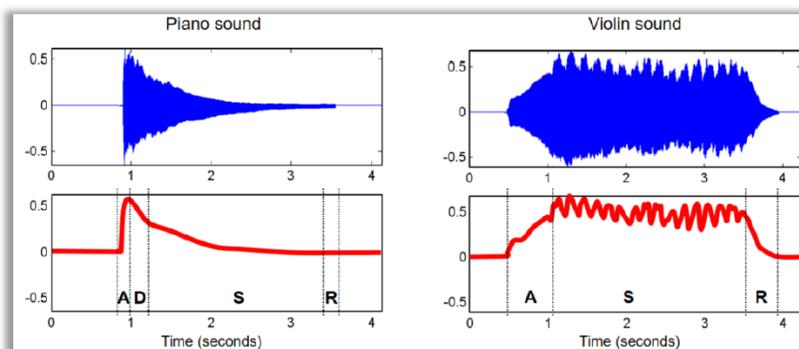
Inicial	Concepto
A	Ataque, Inicio del sonido hasta el máximo punto de amplitud.
D	Decaimiento, desde el máximo punto de amplitud hasta estabilizarse.
S	Sostenimiento, desde el punto de estabilización hasta que pierde su magnitud constante.
R	Relajación, desde que pierde su estabilización hasta el final del sonido.

Nota. Todas las definiciones se refieren al intervalo de tiempo.

“En la **Figura 12** se visualiza la diferencia de la forma temporal de las ondas de dos instrumentos, el piano y el violín, y la forma en la que se aplica la envolvente ADSR a éstos”. (Gonçalves Molina, 2020, p. 20)

Figura 12

Envolvente ADSR. Piano y violín, respectivamente.



Nota. Recuperado de, Gonçalves Molina, 2020, p. 20.

Como señala Ribes Blanco, J. (2012):

“Normalmente, al hacer vibrar un cuerpo, no obtenemos un sonido puro, sino un sonido compuesto de sonidos de diferentes frecuencias. A estos se les llama armónicos. La frecuencia de los armónicos, siempre es un múltiplo de la frecuencia más baja llamada *frecuencia fundamental o primer armónico*”. (p. 8)

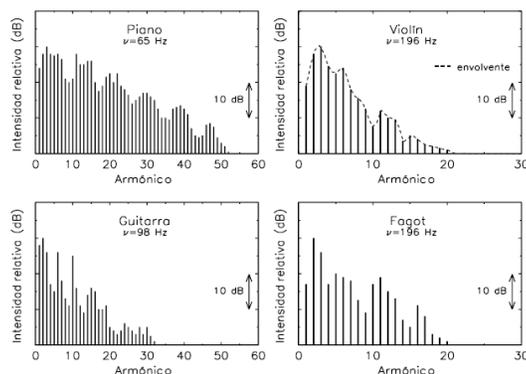
Por otra parte, Rodríguez Ballesteros, I. F. (2013), señala su propia definición de Timbre musical:

“Si se toca el **LA** situado sobre el **DO** central en un violín, un piano y un diapasón, con la misma intensidad en los tres casos, los sonidos son idénticos en frecuencia y amplitud, pero muy diferentes en timbre”. (p. 10)

El diapasón es el instrumento por excelencia utilizado para dar un **LA** afinado, debido a que produce frecuencias de 440 Hz. Sin embargo, en los otros instrumentos al momento de producir la nota, también se producen frecuencias múltiplos de 440 Hz, lo que se denomina como armónicos y son los que definen el timbre característico de cada instrumento, en la **Figura 13**, se observa la descomposición de algunos instrumentos musicales. (Rodríguez Ballesteros, I. F., 2013, p. 10).

Figura 13

Descomposición espectral de algunos instrumentos musicales



Nota. Recuperado de, Rodríguez Ballesteros, I. F. (2013)

de la Fuente, J. M. M. (2001), nos comenta que para poder comprender de mejor manera como un sonido se descompone en sus diferentes armónicos, la forma más clara de hacerlo es por medio del teorema de Fourier:

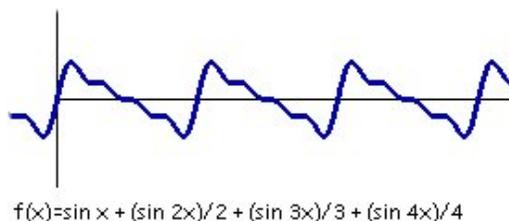
“Gracias al **teorema de Fourier**, desarrollado por el matemático francés Fourier (1807-1822) y completado por el matemático alemán Dirichlet (1829), es posible demostrar que toda función periódica continua, con un número finito de máximos y mínimos en cualquier período, puede desarrollarse como una combinación de senos y cosenos (armónicos)”. (p. 6)

Además, de la Fuente, J. M. M. (2001), asevera que existen oscilaciones que no son armónicas pero que se pueden presentar en una combinación de oscilaciones armónicas, siempre destacando su armónico principal o fundamental que es el de menor frecuencia, cuyos armónicos son potencias de la misma frecuencia fundamental.

“La **Figura 14**, representa la forma de onda de un sonido llamado **diente de sierra**. El sonido se produce a partir de una nota con frecuencia fundamental f a la cual se añaden armónicos de frecuencias $2\cdot f$, $3\cdot f$, $4\cdot f$, y respectivamente amplitudes $1/2$, $1/3$ y $1/4$ ”. (de la Fuente, J. M. M, 2001, p. 6)

Figura 14

Gráfica de la función $f(x)$

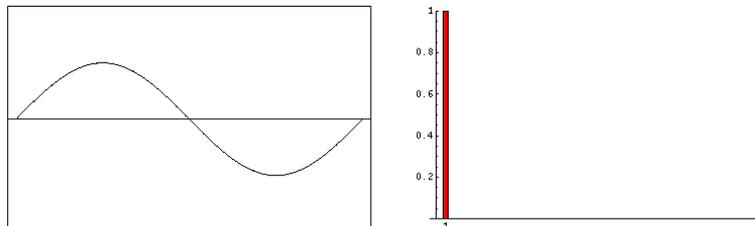


Nota. Recuperado de, www.lpi.tel.uva.es, 2016.

El presente estudio no se enfoca en la forma de entrada de la señal, pero sí en el análisis de Fourier y como éste afecta en la onda tipo diente de sierra de la **Figura 14**, y su descomposición en la **Figura 15**:

Figura 15

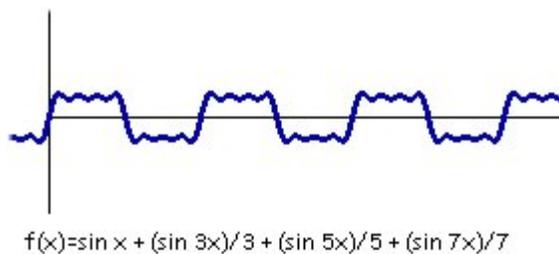
Análisis de Fourier, Armónicos



Nota. Recuperado de, www.lpi.tel.uva.es, 2016.

Figura 16

Gráfica de la función $f(x)$

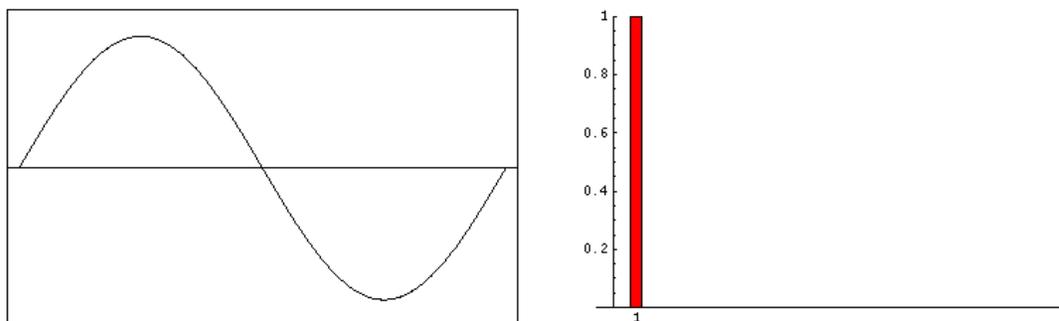


Nota. Recuperado de, www.lpi.tel.uva.es, 2016.

Lo mismo ocurre con la otra onda tipo cuadrada en la **Figura 16**, y su respectiva descomposición en la **Figura 17**, gracias al análisis de Fourier:

Figura 17

Forma de onda cuadrada, Armónicos



Nota. Recuperado de, www.lpi.tel.uva.es, 2016.

Existen sonidos que no son tan armoniosos entre sí, como lo habíamos mencionado antes no son periódicos, se lo conoce como **ruido**.

Afinación

Como lo define Gonçalves Molina (2020), en su investigación asevera que existen instrumentos que pueden producir sonidos con tonos indefinido, como el caso de la voz humana y el violín, pero también existen otros instrumentos que tienen un tono definido como el piano, por ejemplo, con su frecuencia definida por cada tecla.

El mismo autor nos argumenta lo siguiente:

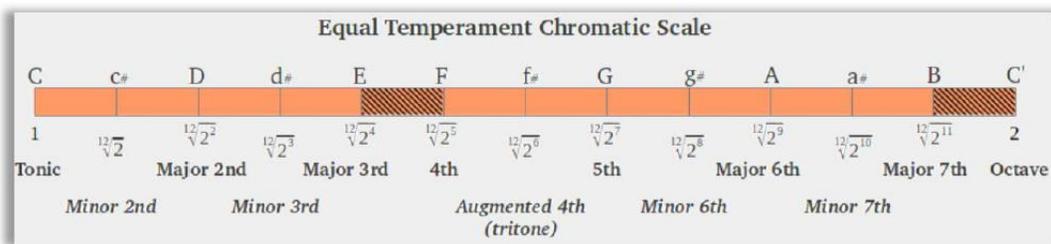
“En la música occidental el sistema más utilizado es el sistema de **temperamento igual**, el cual se refiere a una afinación construida de tal forma en la que los semitonos de la octava están divididos en partes iguales, la relación entre una nota y el siguiente semitono es de $\sqrt[12]{2}$ (**Figura 18**). Los valores de las frecuencias de cada nota en el temperamento igual se conocen mediante la ecuación [4]”. (p. 15)

$$f(n) = (\sqrt[12]{2})^{n-n_0} f_0 \quad [4]$$

En [4], $f(n)$ es la frecuencia a hallar, n el orden del nombre de la nota a determinar, n_0 número de tecla base y f_0 la frecuencia base. Según la Norma ISO 16, la nota de afinación es LA4 cuyo valor de frecuencia es 440 Hz.

Figura 18

Escala Cromática de igual temperamento



Nota. Recuperado de, *Gonçalves Molina*, 2020, p. 16.

Afinadores

Afinadores digitales

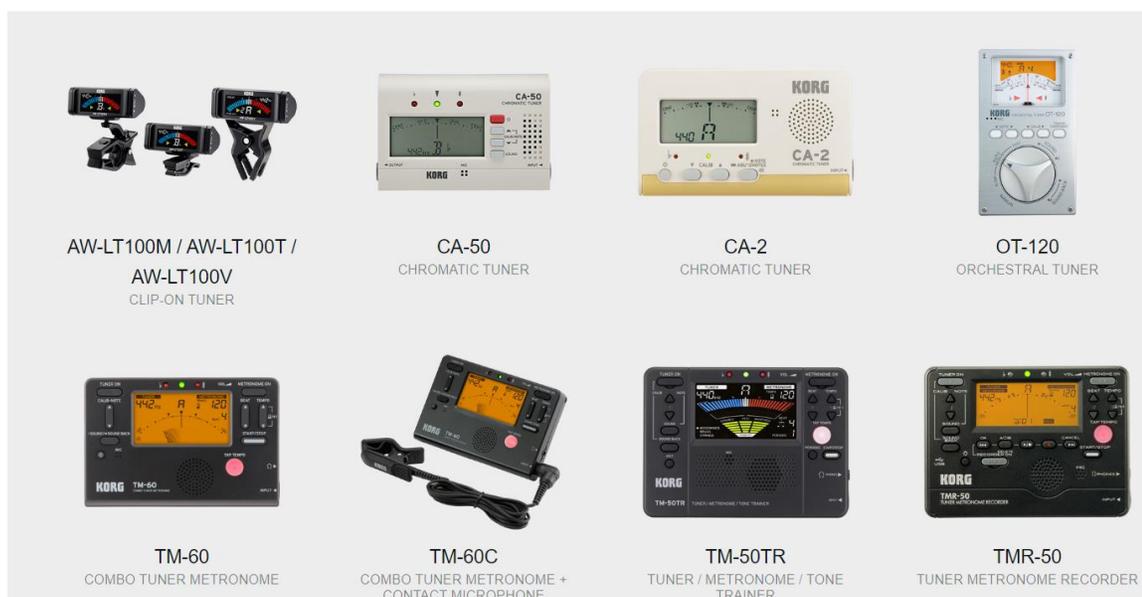
Empleando las palabras de Sánchez Rodríguez, S. (2017) "Un afinador digital es un dispositivo electrónico que indica la diferencia entre la nota tocada por un instrumento y una nota de referencia predefinida, permitiendo ajustar la altura musical o frecuencia de trabajo de dicho instrumento" (p. 23), dependiendo de cada instrumento su organología o ciencia que estudia la construcción de los instrumentos tienen su nota de trabajo o de afinación, hay instrumentos que se afinan con el clásico 440 Hz. (La 4) y otros en 466 y 233 Hz. (Bb 4 y Bb 3, respectivamente) como, por ejemplo, para la trompeta.

Es ampliamente utilizado en orquestas o antes de grabar en un estudio de grabación, debido a que se necesita una afinación precisa para que el trabajo de producción sea de la mayor calidad posible.

En la **Figura 19**, se puede observar diferentes tipos de afinadores comúnmente usados por los músicos en presentaciones, ensayos y grabaciones; algunos de estos vienen incluidas otras funcionalidades como el metrónomo o grabadora, inclusive hay afinadores para orquesta que tienen ajustado la nota de afinación según el instrumento.

Figura 19

Afinadores electrónicos comerciales, marca Korg



Nota. Recuperado de, <https://www.korg.com/es/products/tuners/>, 2021.

La afinación de un instrumento musical es muy importante antes de practicar o tocar en un concierto o presentación en vivo, por lo que cada músico va adquiriendo habilidad auditiva para afinar su propio instrumento con solo escuchar la nota de referencia, pero para nuevos músicos y personas que están incursando en la música es muy complicado realizar esta afinación autónoma, por lo que recurren mucho a estos aparatos electrónicos que son de ayuda incluso para los músicos profesionales cuando se ven en apuros.

Según Byron O. maestro de violín con una trayectoria musical de 37 años nos comenta que el desarrollo de un oído musical es por lo menos 3 años si se repasara todos los días y con una constante formación académica.

Por esta razón y debido a la complejidad de afinar un instrumento de cuerda como es el violín es indispensable la creación de un afinador automático para estos instrumentos.

Afinadores automáticos o mecánicos.

Actualmente existen afinadores automáticos de guitarra que vienen incorporados en el clavijero de la guitarra como es el caso de la Gibson o la Epiphone que son marcas reconocidas mundialmente en la fabricación de guitarras eléctricas, éstas nuevas guitarras vienen incorporadas por un sistema robótico de afinación llamada Min-ETune que afina automáticamente las 6 cuerdas de guitarra en diferentes tonos correctos y con modo de personalizar hasta 6 modos diferentes. Se lo encuentra atrás del mástil tal como se muestra en la **Figura 20**:

Figura 20

Unidad de Afinación atrás del mástil, marca Gibson



Nota. Recuperado de, www.es.gibson.com , 2020.

La unidad de afinación se presenta como en la **Figura 20**, que tiene las 6 clavijas de guitarra los tornillos y por supuesto el dispositivo electrónico que ayuda a autoajustar las clavijas a su correcta afinación. Soporta 90 afinaciones por carga. En la **Figura 21**, se observa el dispositivo desarmado con sus componentes:

Figura 21

Dispositivo desarmado con sus componentes



Nota. Recuperado de, www.es.gibson.com , 2020.

Figura 22

TunerMatic



Nota. Recuperado de, <https://www.tunermatic.com/>, 2021.

Existe otro tipo de afinadores de guitarra como es el Tuner-Matic de la **Figura 22** *TunerMatic*, cuyo precio varía entre \$50 USD y \$200 USD, según el país de importación.

Este afinador se convirtió en el compañero infaltable en los conciertos de nuestro país en el 2013. Tiene la forma de una pinza que se acopla a la forma de las clavijas y las gira hasta conseguir el tono correcto, se adjunta un video oficial de su funcionamiento:

<https://youtu.be/c8sKs2wJvy4>

Afinadores automáticos para violín comerciales no existen hasta la fecha de la presente investigación.

Sistema de control

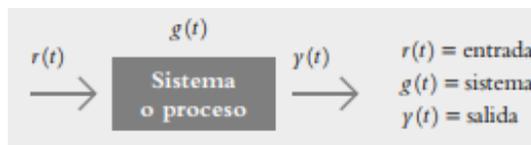
“Podemos definir a un sistema de control como, la interconexión de elementos que forman un sistema, en el cual el conjunto resultante de los elementos puede ser controlado por sí mismo”. (HERNÁNDEZ GAVIÑO, 2010, p. 2)

Otra definición acertada es la de Ogata (1998) el cual sugiere que: “Los sistemas de control actuales son, por lo general, no lineales. Sin embargo, si es posible aproximarlos mediante modelos matemáticos lineales, podemos usar uno o más métodos de diseño bien desarrollados” (p. 8);

En la **Figura 23**, se presenta una síntesis de cómo funciona un proceso, con un bloque el cual representa al sistema, una flecha que llega hacia el bloque, la cual representa la entrada, y una flecha que sale del bloque la cual representa la salida del sistema. (HERNÁNDEZ GAVIÑO, 2010, p. 2)

Figura 23

Diagrama de un proceso.

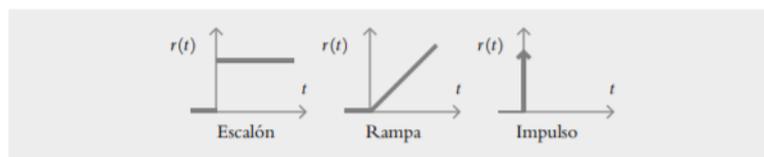


Nota. Recuperado de “*Introducción a los sistemas de control: Conceptos, aplicaciones y simulación con MATLAB*”, de Hernández, 2010.

Las entradas típicas para el sistema o planta, son las entradas tipo: impulso, rampa, y escalón, como en la **Figura 24** , siendo la primera la más común de todas. (HERNÁNDEZ GAVIÑO, 2010, p. 3)

Figura 24

Formas de entrada.



Nota: Recuperado de “*Introducción a los sistemas de control: Conceptos, aplicaciones y simulación con MATLAB*”, de Hernández, 2010.

Acerca de los tipos de entrada Hernández, (2010) comenta lo siguiente:

“La entrada escalón indica un comportamiento o una referencia constantes introducidos al sistema, mientras que la entrada rampa supone una referencia con variación continua en el tiempo, y la entrada impulso se caracteriza por ser una señal de prueba con magnitud muy grande y duración muy corta”. (p. 2)

Además, Hernández (2010) responde sobre la interrogante de lo que es una función de transferencia:

“La función respuesta impulso o función de transferencia es la representación matemática del sistema. Básicamente, el problema de control consiste en seleccionar y ajustar un conjunto específico de elementos tal que, al interconectarse, el sistema resultante deberá comportarse de una manera específica”. (p. 2)

Partes de un sistema de control

Los principales elementos son:

- Sensores – Dispositivos electrónicos como, por ejemplo, un transductor. que transforma una señal física en una señal medible eléctricamente, permite conocer el valor de la salida del proceso, para su posterior retroalimentación.
- Controlador – Mediante un valor deseado, procesa la información de entrada para conseguir dicho valor en la variable controlada aplicando una acción a los actuadores, utilizando la diferencia entre la consigna y el valor de los sensores en el lazo de retroalimentación.
- Actuador – Elemento mecánico capaz de ejercer una acción al sistema, cambiando el valor de la salida de acuerdo a la acción ejecutada por el controlador.

Clasificación de los Sistemas de Control

Según Hernández, (2010) “los sistemas de control se pueden dividir en sistemas no automático o de lazo abierto y los automáticos o de lazo cerrado, pero antes debemos definir que es una acción de control es la cantidad dosificada de energía que afecta al sistema para producir la salida o la respuesta deseada”. (p. 5)

Sistema de Control No Automático. Dicho con palabras de Hernández, (2010) “Es aquel sistema en el cual la acción de control es, en cierto modo, independiente de la salida” (p. 5)

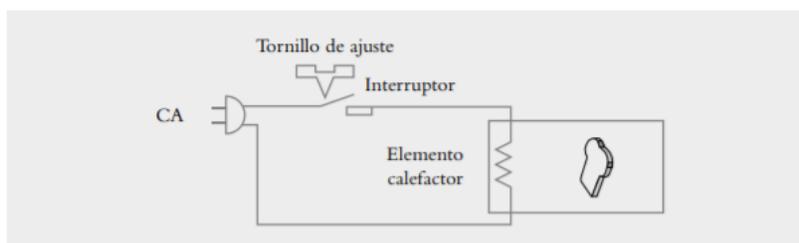
Por otra parte, Ogata, (1998) argumenta lo siguiente: “Cuando la salida no afecta la acción de control se denominan sistemas de control en lazo abierto. En un sistema de control en lazo abierto no se mide la salida ni se realimenta para compararla con la entrada” (p. 7), es decir que el resultado del controlador no altera o cambia la información de entrada o set point que el usuario determine.

Algunos ejemplos de estos sistemas son las tostadoras, las lavadoras, microondas y en la calle los semáforos, todos ellos con el tiempo como variable común, por lo que el usuario decide la operación inicial y por medio de un programa interno o controlador manda una determinada señal de control inalterable donde se ejecuta el proceso deseado obteniendo a la salida el resultado elegido con anterioridad. (Hernández, 2010).

Como se muestra en la **Figura 25** una tostadora, donde el usuario pone el pan y en un determinado tiempo salta el tornillo de ajuste desconectando la energía y por ende el elemento calefactor, es un sistema no automático:

Figura 25

Tostadora, Sistema no automático.



Nota. Recuperado: “Introducción a los sistemas de control: Conceptos, aplicaciones y simulación con MATLAB”, de Hernández, 2010.

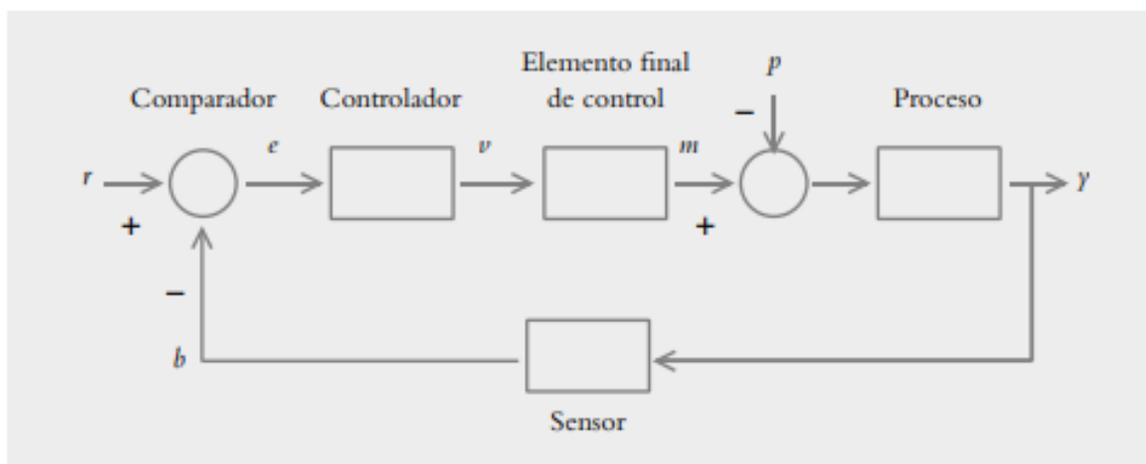
Sistema de control Automático. Según Hernández, (2010): “Un sistema de lazo cerrado es aquel sistema en el cual la acción de control depende de la salida. Dicho sistema utiliza un sensor que detecta la respuesta real para compararla, entonces, con una referencia a manera de entrada” (p. 5-6)

Por otro lado, Ogata, (1998) define: “Un sistema de control en lazo cerrado, se alimenta al controlador la señal de error de actuación, que es la diferencia entre la señal de entrada y la señal de realimentación” (p. 7)

Ambas definiciones describen algo en común una comparación o resta de dos valores, entrada o puede ser el de referencia, con el valor resultante al final del sistema gracias al valor obtenido del sensor ubicado al final del proceso lo que da como resultado una señal de error que entra directamente al controlador el cual manda una determinada señal eléctrica hacia algún componente de la planta para corregirlo hasta llegar al punto ideal o set point. En la **Figura 26**, se muestra de mejor manera lo explicado anteriormente:

Figura 26

Diagrama de un sistema Automático



Nota. Recuperado de “Introducción a los sistemas de control: Conceptos, aplicaciones y simulación con MATLAB”, de Hernández, 2010.

Tipos de controladores

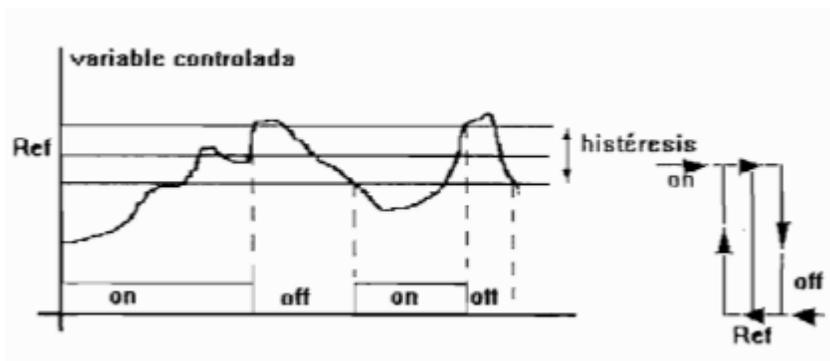
Control On- Off

Es la manera más simple de control, ya que la salida está encendida o apagada sin punto intermedio, en este tipo de control se activa o desactiva el actuador cuando se cruza por la referencia establecida. Para preservar los contactores y la vida útil de los actuadores se opta por un control On-Off con histéresis, el cual plantea un rango de valores delimitando un máximo y un mínimo, donde se efectuará los cambios de estado de encendido a apagado y viceversa, evitando de esta manera los cambios bruscos en la salida. (Rodriguez, 2000)

En la **Figura 27**, se puede observar el funcionamiento de este tipo de controlador donde se tiene un rango de funcionamiento para evitar el desgaste previamente mencionado de los equipos eléctricos y electrónicos:

Figura 27

Funcionamiento del Control On- Off con histéresis



Nota. La figura describe el funcionamiento de un control On- Off, observando las zonas donde se activa y se desactiva el control mostrando la histéresis de valores alrededor de la referencia. Recuperado de “Control con histeresis lazo cerrado”, de Mesias, 2010.

Controlador tipo P

El control proporcional, como su nombre lo dice, entrega un valor proporcional a la señal de error, responde rápidamente ante una perturbación, proporcionando una buena estabilidad, las desventajas de este tipo de controlador es que el controlador será muy sensible al ruido o perturbaciones, además de presentar un error en estado estable, la ecuación [5] describe este tipo de controlador: (Ogata, 2010).

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \quad [5]$$

Controlador tipo PI

El control proporcional, Integral se centra en reducir a cero el valor del error en estado estacionario, además de proporcionar una rápida respuesta ante perturbaciones por medio de la acción proporcional, la característica principal de este controlador es producir una respuesta oscilatoria, empeorando la respuesta del sistema. La ecuación [6] se define como:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad [6]$$

Controlador tipo PID

Trabaja directamente sobre el error del sistema, en el último medio siglo este controlador ha ocupado el 90 % de las soluciones en sistemas de lazo cerrado (Knospe, 2006).

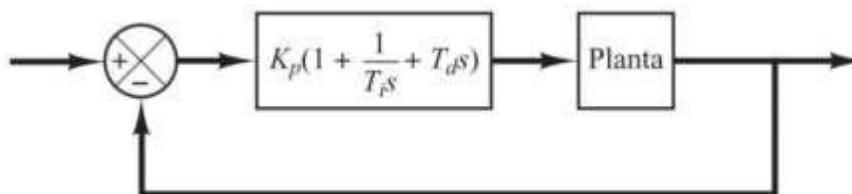
Un control PID cumplen con requisitos puntuales los cuales sería tener un rápido tiempo de estabilización, mantener el error en cero durante el estado estacionario y tener un completo rechazo hacia las perturbaciones. Convirtiéndolo en uno de los

controladores más robustos de la industria. Se presenta dicho controlador en la ecuación [7] y en la **Figura 28**:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad [7]$$

Figura 28

Representación de un controlador PID.



Nota. Se muestra los diferentes componentes de un control PID Recuperado de “*Ingeniería de control Moderna*”, de Ogata, 2010.

FFT (Fast – Fourier Transform)

Tal como dice Gonçalves Molina, Y. D. C. (2020): “El Teorema de Fourier demuestra que toda señal periódica compleja puede ser dividida en infinitas sinusoides, las cuales tienen una relación armónica en la cual la frecuencia fundamental contiene el período de la señal compleja que se analiza.” (p. 18), con este teorema descubierto por Baptiste Joseph Fourier fue capaz de descifrar una función compleja en funciones mucho más simples y sencillas para su análisis.

Antes de aplicar el teorema se puede ver una frecuencia de espectros armónicos, pero se desconocen su amplitud, para ello el teorema demuestra que, al ser una amplitud de una señal, se pueda descifrar como una suma de funciones armónicas simples que tenga la señal. (Gonçalves Molina, Y. D. C. ,2020, p. 18)

Gonçalves Molina, Y. D. C. (2020), señala que “El período del primer armónico es el mismo de la señal compleja y por lo tanto éste se podría expresar como la ecuación [8].” (p. 18).

$$s_1(t) = A_1 \cos(2\pi f_1 t + \varphi_1) \quad [8]$$

Por medio de un artificio trigonométrico se evita trabajar con las fases y sus amplitudes en simultáneo, definida en la ecuación [9]:

$$s(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n2\pi f_1 t) + b_n \sin(n2\pi f_1 t)) \quad [9]$$

Casi siempre a_0 es cero debido a que es el valor medio de la función en las señales acústicas, por lo tanto, los coeficientes a_n y b_n se calculan por medio de las relaciones de Euler definidas por las ecuaciones [10] y [11]:

$$a_n = \frac{2}{P} \int_0^P f(t) \cos(n2\pi f_1 t) dt \quad [10]$$

$$b_n = \frac{2}{P} \int_0^P f(t) \sin(n2\pi f_1 t) dt \quad [11]$$

En donde ρ es el periodo fundamental de la señal.

Pero debido a que se trabaja con microprocesadores y electrónica, tomar todos los datos hasta el infinito sería un consumo “infinito” de memoria dinámica por lo que se recomienda el uso de la FFT, ideal para usarlo en ordenadores o microprocesadores, “la cual permite reconstruir la señal periódica compleja utilizando una frecuencia de muestreo F_s como en la ecuación [12].” (Gonçalves Molina, Y. D. C. ,2020, p. 18)

$$s(n) = \frac{1}{2}a_0(n) + \sum_{k=1}^{k_{max}} r_k(n) \cos\left(\frac{2\pi f_0}{F_s} + \varphi_k(n)\right) \quad [12]$$

Y, de igual forma se calculan los coeficientes en la ecuación [13] y [14]:

$$a_k(n) = r_k(n) \cos(\varphi_k(n)) \quad [13]$$

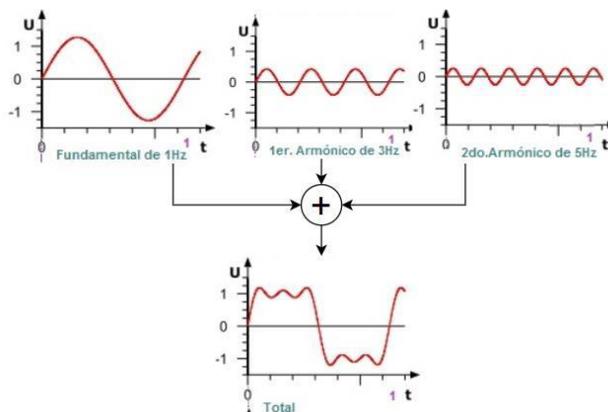
$$b_k(n) = r_k(n) \sin(\varphi_k(n)) \quad [14]$$

Gonçalves Molina, Y. D. C. (2020) concluye que:

“En la FFT se tiene en cuenta el teorema de muestreo de Nyquist-Shannon para garantizar la construcción de la señal original, éste permite realizar dos funciones fundamentales durante el análisis del audio: descomponer una onda periódica compleja en los componentes simples que la conformen, como se muestra en la **Figura 29**, y obtener las amplitudes y frecuencias de cada armónico a partir de la señal en el dominio del tiempo, lo cual se observa en la **Figura 30**”. (p.19)

Figura 29

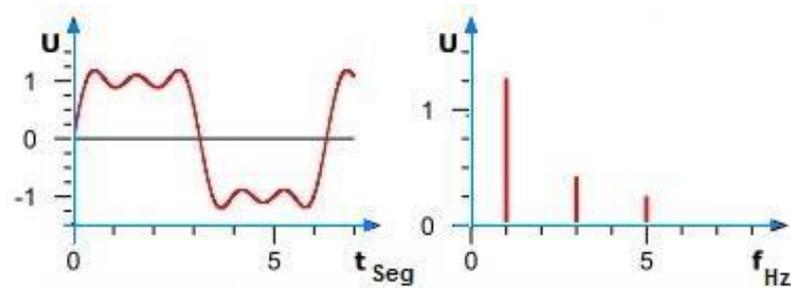
Suma de ondas. Descomposición de las mismas



Nota. Recuperado de Gonçalves Molina, Y. D. C. ,2020, p. 19.

Figura 30

FFT aplicada, respuesta en dominio de tiempo y de frecuencia



Nota. Recuperado de *Gonçalves Molina*, Y. D. C. ,2020, p. 19.

Vibración de una cuerda

Desde el siglo XVIII, varios matemáticos han estudiado el problema de la cuerda vibrante, el primero de ellos en elaborar un modelo apropiado “fue Jean Le Rond D’Alembert. Bajo diversas hipótesis, fundamentalmente a que las vibraciones sean pequeñas, D’Alembert demostró en 1747 que la función u debe satisfacer las siguientes condiciones”. (DEL CALOR, E. D. O. Y., 2000, p. 3 – 4)

$$\frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x^2}, \quad 0 < x < \pi, t > 0 \quad [15]$$

$$u(x, 0) = f(x), \quad 0 \leq x \leq \pi \quad [16]$$

$$\frac{\partial u(x, 0)}{\partial t} = 0, \quad 0 \leq x \leq \pi \quad [17]$$

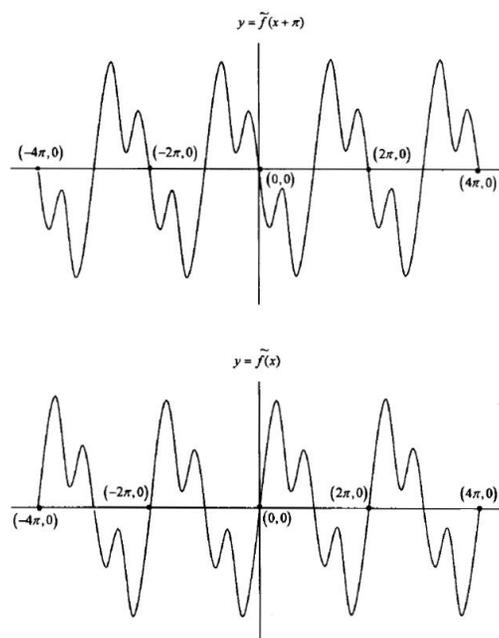
$$u(0, t) = u(\pi, t) = 0, \quad t \geq 0. \quad [18]$$

La ecuación [15], se define como la Ecuación de Ondas en derivadas parciales. La ecuación [16], x_0 o se define como la posición inicial de la cuerda, [17] V_0 o velocidad inicial, como parte del reposo es igual a 0 y la ecuación [18] que nos dice que está sujeta en sus extremos y por lo tanto en esos puntos no hay movimiento y es igual a 0.

La solución de la ecuación [15] “es la superposición de dos ondas, una de las cuales se desplaza hacia la izquierda y otra hacia la derecha, ambas con la misma velocidad, se ha obtenido usando el Método de propagación de las ondas” como se ve en la **Figura 31**. (DEL CALOR, E. D. O. Y., 2000, p. 296)

Figura 31

Método de propagación de las ondas.



Nota. Recuperado de *DEL CALOR, E. D. O. Y., 2000, p. 296 – 297*

Otra manera de obtener la solución de la ecuación de Alembert fue propuesta por Bernoulli (1753), definida como una superposición de ondas más sencillas, como en la ecuación [19]:

$$u_n(x, t) = \sin(nx) \cos(nt), \quad \forall n \in N \quad [19]$$

La ecuación [19] nos indica que para un tiempo t , la última función es un múltiplo de la función $\sin(nx)$, que se anula en $n-1$, formando los llamados nodos. Por lo que Bernoulli se fundamentó que el sonido producido por una cuerda vibrante es una superposición de armónicos basados en funciones de la forma $u(x,t)$, gracias a sus conocimientos musicales, donde 1 es el tono fundamental y cuando n es mayor a 1 son sus armónicos. (DEL CALOR, E. D. O. Y., 2000, p. 298 – 299)

$$u(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(nx) \cos(nt) \quad [20]$$

Se define la ecuación [20], donde los coeficientes a_n se deben elegir adecuadamente para que satisfaga la ecuación de ondas. Bernoulli llegó a esta conclusión debido a al cuestionamiento de la fórmula planteada por Euler, afirmando que solamente se trabajó la ecuación en el caso de superposiciones finitas, y lo hizo calculando infinitas soluciones, llegando a la ecuación [21], que a posteriores años lo resuelve Fourier con sus respectivos coeficientes a_n . (DEL CALOR, E. D. O. Y., 2000, p. 299)

$$f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(nx), \quad \forall x \in [0, \pi] \quad [21]$$

Impresión 3D

La impresión 3D ha ido evolucionando a pasos agigantados en los últimos años, considerado ya como una solución para las prótesis en humanos y dispositivos funcionales en la industria. (Gámez et al., 2016)

El aporte de Gámez et al. (2016) menciona que casi todo el prototipo de su diseño fue hecho en ABS con un módulo de elasticidad de 200 Mpa.

En la industria Odremán, J. G. (2014), habla sobre la implementación de impresión 3D en la industria como el prototipado rápido utilizado por la NASA para crear trajes espaciales e inyectores de cohetes que llegan a soportar los 3300° C.

En la tesis de Galarza, J. (2019), diseña un “prototipo de brazo robótico de 6 grados de libertad” impreso totalmente en 3D por manufactura aditiva FDM, obteniendo gran rigidez y peso liviano a comparación de los brazos que existen en el mercado, sin mencionar el precio de la impresión 3D comparado a brazos de aluminio o metal.

Método FDM o por extrusión de material

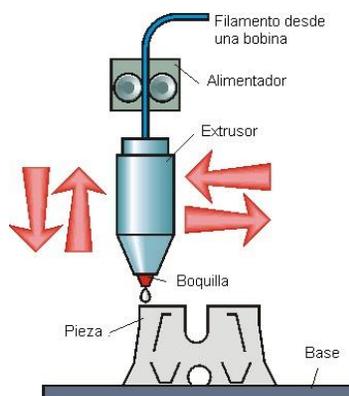
Se convierte en el proceso más utilizado en el Ecuador debido a su bajo costo y fácil implementación.

De la definición de Ojeda, M (2013) podemos argumentar que es una tecnología que se desarrolló cerca del año 1980 por Stratasys, dicha tecnología utiliza material de plástico en forma de alambre fino (1.75 mm) que se encuentra enrollado en una bobina y a medida que va construyendo el prototipo, se va desenrollando a través de una boquilla de extrusión caliente (200°C) de diámetro 0.4 mm para derretir el material o fundirlo, el mismo que se va depositando en una cama caliente para su posterior enfriamiento y solidificación.

Dicha boquilla se mueve de acuerdo a una programación previa hecha en CAM del modelo 3D del prototipo, casi siempre, se utiliza motores paso a paso o servomotores para dicho movimiento programado. En la **Figura 32**, se presenta un esquema de su funcionamiento:

Figura 32

Proceso de manufactura aditiva FDM



Nota. Recuperado de <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2013/02/impresion-3d.html>, (2013)

Materiales de impresión 3D por FDM

En el mercado existen varios materiales para realizar FDM, pero sin embargo los más populares y los que permiten las impresoras de bajo costo sin duda son el PLA y el ABS.

ABS. (Acrilonitrilo Butadieno Estireno)

Tal como lo describe Brito, D., & Castellanos, J. (2019) en su tesis, está compuesto en base a tres monómeros: Acrilonitrilo, Butadieno y Estireno, cada uno da su respectiva resistencia química, al impacto y da rigidez al material, respectivamente.

PLA. (Ácido Poli láctico)

De igual manera Brito, D., & Castellanos, J. (2019) describe al PLA de una manera precisa y muy concreta:

“Es un polímero biodegradable, tiene su origen en el almidón proveniente de vegetales como: maíz, yuca, trigo, remolacha o caña de azúcar, lo que facilita su fuente de extracción alejándola de los procesos de transformación de los hidrocarburos que caracterizan la obtención de otros polímeros”. (p. 3)

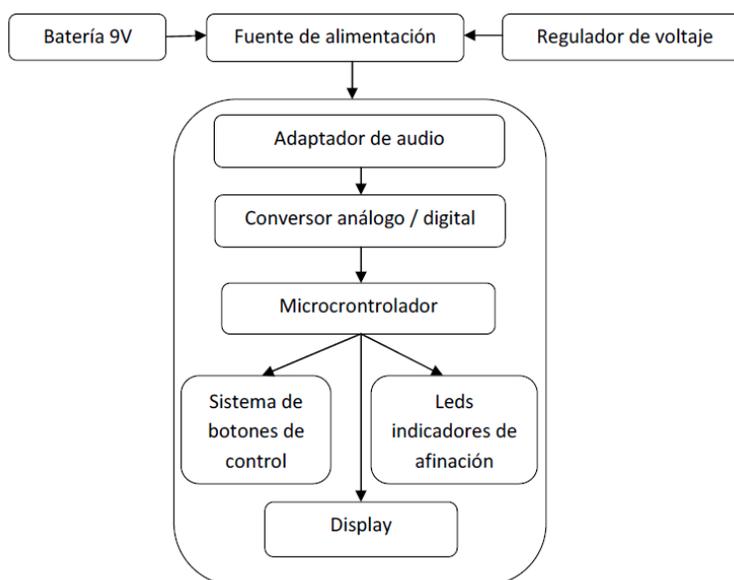
ESTUDIO DEL ARTE

Trabajos nacionales:

1.- (Catuta, 2014) realizó un estudio titulado: “Diseño E Implementación De Un Afinador Electrónico Para El Estudio De Diferenciación Del Sonido En Una Guitarra Primer Electroacústica” en la capital del Ecuador. El objetivo general del estudio fue diseñar e implementar un afinador electrónico para una guitarra electroacústica capaz de identificar la nota musical y su valor en hertzios. La muestra estuvo constituida por una guitarra de la marca Primer. El diseño que se utilizó fue un experimental propiamente dicho. Los instrumentos que se usó fue el prototipo diseñado y los resultados obtenidos han sido exitosos puesto que el dispositivo capta la frecuencia del instrumento y logra identificar la nota y su frecuencia con un rango de error del 5%. El valor económico del dispositivo según el autor es de \$ 1130 USD. En la **Figura 33** *Partes del prototipo.* se presenta las partes del prototipo:

Figura 33

Partes del prototipo.

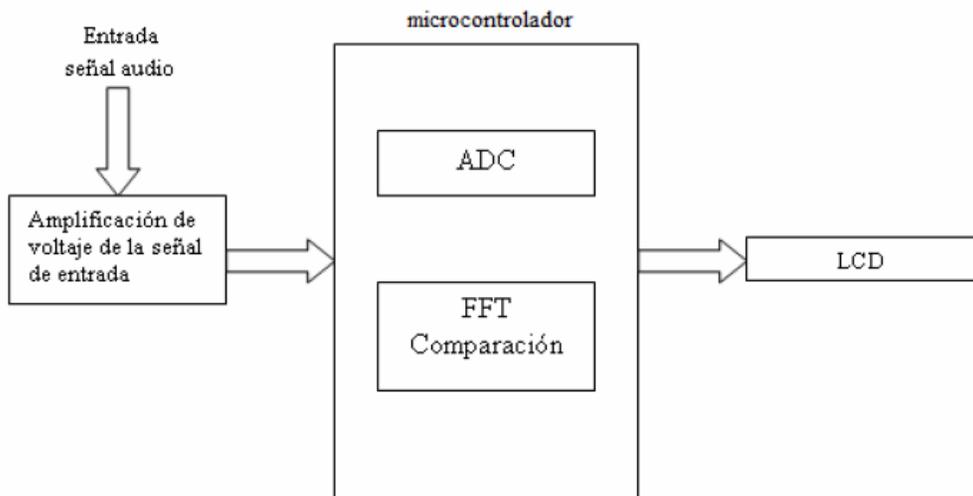


Nota. Recuperado de Catuta, (2014).

2.- (Ibarra, 2007) investigó su tema: “Diseño E Implementación De Un Prototipo De Un Afinador Digital De Instrumentos Musicales Con Dspic30f3014” en Ecuador. El objetivo general del estudio fue diseñar e implementar un afinador digital para instrumentos musicales capaz de identificar la nota musical y su valor en hertzios. La muestra estuvo constituida por una guitarra y violín. El diseño que se utilizó fue un experimental propiamente dicho. Los instrumentos que se usó fue el prototipo diseñado y los resultados obtenidos han sido medianamente aceptables, puesto que el error mayor en las frecuencias de la guitarra fue de 10 % y en el violín las frecuencias de calibración estuvieron mal, puesto que son más agudas que el de la guitarra, a pesar de ello el dispositivo detectaba el sonido y se definía la frecuencia de la nota correcta debido a su armónico fundamental. En la **Figura 34**, se detalla su proceso de funcionamiento:

Figura 34

Proceso de funcionamiento del prototipo



Nota. Recuperado de Ibarra, (2017).

3.- (Andrade & Jurado, 2013) realizó un estudio titulado: “Diseño Y Construcción De Un Sistema Automático De Afinación De Guitarras Eléctricas De La Serie Prv De Vogel Guitars” en la capital del Ecuador. El objetivo general del estudio fue diseñar y construir un sistema que mejore la afinación en guitarras, con dos modos de uso y un HMI capaz de conectarse inalámbricamente. La muestra estuvo constituida por una guitarra marca Vogel. El diseño que se utilizó fue un experimental propiamente dicho. Los instrumentos que se usó fue el sistema automático implementado a través de actuadores e interfaces de usuario capaces de afinar automáticamente a la guitarra y los resultados obtenidos fueron exitosas por cada cuerda de forma ascendente y descendente, es decir, de una frecuencia baja a la ideal y de una frecuencia alta a la ideal. Donde se muestra el tiempo y la variación de los Hz, el tiempo de ajuste varía entre 2.2 segundos a 4 segundos. Dependiendo de la cuerda que se esté afinando. El costo del proyecto es de USD \$ 527.91. En la **Figura 35**, se presenta la interfaz HMI que trabajaba inalámbricamente:

Figura 35

Interfaz HMI de LabView para trabajar remotamente

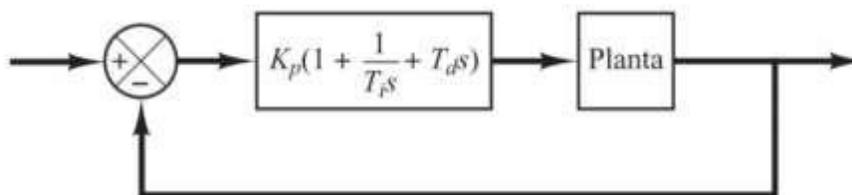


Nota. Recuperado de Andrade & Jurado, (2013).

4.- (Balcázar Bustamante, 2020) realizó un estudio titulado: “Diseño E Implementación De Pedales De Guitarra Eléctrica De Afinación, Distorsión Y Delay” en la capital del Ecuador. El objetivo general del estudio fue Diseñar e implementar dispositivos para diferentes funciones típicas de la guitarra. La muestra estuvo constituida por dos expertos en guitarra eléctrica. El diseño que se utilizó fue un experimental propiamente dicho. Los instrumentos que se usó fue una tarjeta de desarrollo de 32-bits STM32F103C y los resultados, en general, las encuestas arrojaron buenos resultados y demostraron que los pedales implementados pueden llegar a competir con los pedales existentes en el mercado, el costo de los tres pedales estuvo alrededor de los \$ 265 USD siendo inferior a los actuales en el mercado. En la **Figura 36**, se presenta el tipo de controlador utilizado en el proyecto:

Figura 36

Representación del controlador PID usado



5.- (Valdez Moncayo, 2014) realizó un estudio titulado: “La Melodía De Las Matemáticas” en la capital del Ecuador, cuyo objetivo es relacionar la ciencia de las matemáticas con la música. El diseño que se utilizó fue un Descriptivo correlacional. Los instrumentos que se usó fueron logaritmos creados por el autor para relacionar la música con las matemáticas y los resultados obtenidos fueron que:

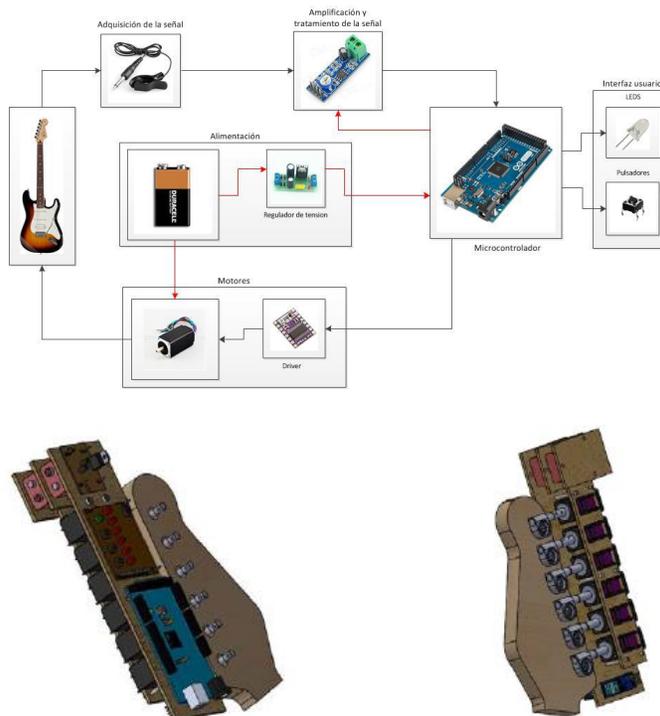
“se ha logrado demostrar que los patrones y estructuras matemáticas encontrados en la música son bastante útiles, no sólo para la etapa de composición, sino también para la memorización de quienes las interpretan” (p. 120).

Trabajos internacionales:

1.- (Sánchez, 2016) nos presenta su trabajo de titulación: “Diseño Y Montaje De Un Prototipo Funcional De Un Afinador Automático De Guitarra”, en la ciudad de Madrid, España. El objetivo general del estudio fue diseñar y montar un afinador automático de guitarra. La muestra fue una guitarra eléctrica. El diseño que se utilizó fue un experimental propiamente dicho. Los instrumentos que se usó fue el prototipo creado por el autor implementado en su guitarra eléctrica y los resultados obtenidos no fueron lo esperado, puesto que, por un mal cálculo teórico, los actuadores implementados no tuvieron suficiente fuerza para ajustar las cuerdas, por lo que los resultados estuvieron con un porcentaje de error alto, aproximadamente del 25% en cada cuerda. El costo del prototipo fue de \$ 360 USD. En la **Figura 37**, se presenta el esquema de conexión:

Figura 37

Esquema de conexión utilizado en el proyecto y prototipado 3D



Nota. Recuperado de Sánchez, (2016)

2.- (García, 2016) realizó un estudio titulado: “Diseño E Implementación De Un Afinador Cromático Para Guitarra” en la ciudad de Madrid, España.

El objetivo general del estudio fue el diseño de “un afinador analógico y un afinador cromático digital para guitarra”. Se utilizó un diseño experimental. Los instrumentos que se usó fue el prototipo creado por el autor utilizando un microprocesador de la “serie Tiva C para el procesamiento de la señal y su respectiva FFT” y los resultados obtenidos fueron favorables ya que funcionaba perfectamente dando la frecuencia exacta de la cuerda que se tocaba, con mínimo de error del 3%. El costo del proyecto fue alrededor de los USD\$ 200. (p. 10)

En la **Figura 38**, se presenta el circuito impreso del proyecto:

Figura 38

Circuito impreso del proyecto



Nota. Recuperado de García, (2016)

3.- (Paredes, 2017) realizó un estudio titulado: “Afinador De Guitarra Automático”. El objetivo general del estudio fue la creación de un afinador automático para guitarra. La muestra fue una guitarra. El diseño que se utilizó fue un experimental

propiamente dicho. Los instrumentos que se usó fue el prototipo creado por el autor cuyo: “elemento encargado de ajustar o desajustar las clavijas es un servomotor que será colocado en su posición, haciendo contacto con la clavija de la cuerda elegida” (p. 60). Y los resultados obtenidos fueron favorables ya que ajustaba o aflojaba la cuerda en su correcta afinación y tensión de la nota y por medio de una pantalla se monitoreaba todo el tiempo el estado del dispositivo. En la **Figura 39**, se presenta la pantalla LCD funcionando:

Figura 39

Proyecto funcionando en una pantalla LCD



Nota. Recuperado de *Paredes*, (2017).

4.- (Ruda Gazcón-Araoz, 2019) realizó un estudio titulado: “Diseño Y Desarrollo De Un Afinador Automático De Guitarra”. El objetivo general del estudio fue:

“Construir un afinador automático de guitarra, el cual será capaz de adquirir la vibración de las cuerdas de una guitarra, con el fin de identificar si estas se encuentran afinadas (respecto a una frecuencia de referencia) o en caso contrario ajustar la tensión de las diferentes cuerdas del instrumento de forma automática”. (p. 10)

La muestra fue una guitarra. El diseño que se utilizó fue un experimental propiamente dicho. Los instrumentos que se usó fue el prototipo creado en impresión 3d

y los resultados obtenidos fueron favorables, puesto que ajustaban o desajustaban a la perfección las cuerdas de la guitarra.

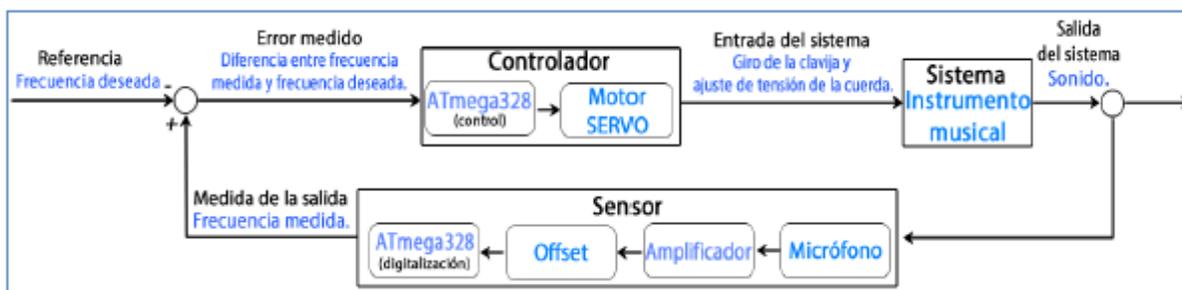
5.- (Salazar, 2015) realizó un estudio titulado: “Diseño De Un Afinador Electromecánico Para Instrumentos De Cuerda Con Sistema Sinfín-Corona”. El objetivo general del estudio fue

“El diseño de un afinador para instrumentos de cuerda que incorporen un sistema de encordado basado en engranajes sinfín-corona. El diseño propuesto, además de identificar la nota musical que está produciendo el instrumento, hace girar el sistema de clavijas del mismo y ajusta la tensión de la cuerda correspondiente para dejarla en el tono correcto deseado por el usuario”. (p. 10)

La muestra fue para guitarras, bajos, vihuelas, charangos, laúds, etc. Que posea este sistema de encordado, el sinfín-corona. El diseño que se utilizó fue un experimental propiamente dicho. Los instrumentos que se usó fue el prototipo creado por el autor y en los resultados podemos observar que en la guitarra obtuvo un tiempo medio de 8 segundos y de precisión en Hz de 1.2 aproximadamente. En la **Figura 40**, se observa su esquema de control y en la **Figura 41**, el prototipo construido:

Figura 40

Lazo de control del dispositivo afinador



Nota. Recuperado de Salazar, (2015).

Figura 41

Prototipo construido



Nota. Recuperado de Salazar, (2015).

Glosario de Términos

A continuación, se detallan las definiciones de algunos términos que se consideran importantes:

Afinación del violín

Un libro muy utilizado en Ecuador es el método (Suzuki, 2007) el cual define lo siguiente: “La afinación es la base de una ejecución. Siempre afine las cuerdas porque es el centro del cultivo apropiado del timbre preciso y la sensibilidad tonal” (p. 13).

Siempre que se inicia en un nuevo instrumento musical es recomendable utilizar aparatos electrónicos incorporados con un medidor de frecuencias o de notas. (Suzuki, 2007)

La Escala Temperada.

En el siglo XVII cuando las escalas musicales eclesiásticas se convirtieron en los modos mayor y menor, que se manejan actualmente, surgió un problema.

La escala cromática, en teoría, posee 7 octavas con 12 quintas justas. Pero al calcular por medio de la relación de quintas da mucho más que siete octavas.

En teoría, 7 octavas serían de la siguiente manera:

$$2^7 = 128$$

Pero al hacerlo en forma de quintas, se obtiene un poco más que 128; Una quinta justa corresponde a una relación de 3:2, es decir, 1.5, si son 12 quintas sería:

$$1.5^{12} = 129.746$$

Si dividimos 129.746/128, se obtiene la llamada coma pitagórica que equivale a la 0.25 de semitono.

Para facilitar, Werckmeister (1686), introdujo la afinación temperada, dividiendo “matemáticamente a la octava en 12 partes iguales”, eliminando la coma pitagórica y facilitando su uso en teclados y escritura musical.

“Al ser la frecuencia de cada octava el doble de la anterior, la distancia entre cada semitono será la raíz doceava de 2 o sea 1.0594631”. (Serracanta, 2021)

Cambiando algunas frecuencias por la escala temperada y la que se usa en la música como se puede ver en la **Figura 42**.

Figura 42

Relación de las 12 notas musicales y sus octavas con la frecuencia en Hz.

Frecuencia (en Hertzios) de las notas musicales SIN TEMPERAMENTO										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8
n=1	do		32.7	65.41	130.81	261.63 264	523.25 528	1046.50	2093.00	4186.01
n=2	do#		34.65	69.30	138.59	277.18	554.37	1108.73	2217.46	4434.92
n=3	re		36.71	73.42	146.83	293.66 297	587.33	1174.66	2349.32	4698.64
n=4	re#		38.89	77.78	155.56	311.13	622.25	1244.51	2489.02	4978.03
n=5	mi		41.2	82.41	164.81	329.63 330	659.26	1318.51	2637.02	5274.04
n=6	fa	21.826	43.65	87.31	174.61	349.23 352	698.46	1396.91	2793.83	5587.65
n=7	fa#	23.125	46.25	92.50	185.00	369.99	739.99	1479.98	2959.96	5919.91
n=8	sol	24.50	49.00	98.00	196.00	392.00 396	783.99	1567.98	3135.96	6271.93
n=9	sol#	25.96	51.91	103.83	207.65	415.30	830.61	1661.22	3322.44	
n=10	la	27.50	55.00	110.00	220.00	440.00 440	880.00	1760.00	3520.00	
n=11	la#	29.14	58.27	116.54	233.08	466.00	932.33	1864.66	3729.31	
n=12	si	30.87	61.74	123.47	246.94	493.88 495	987.77	1975.53	3951.07	

Nota. Recuperado de, <http://www.historiadelasinfonia.es/>, 2016.

Violín

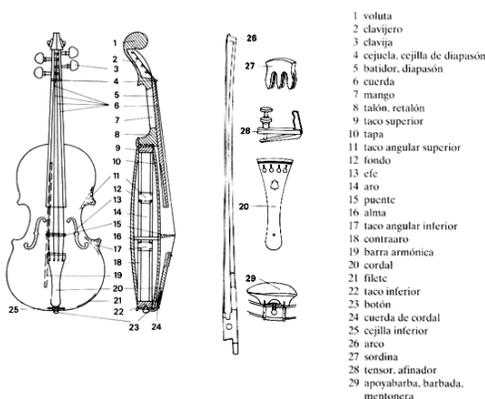
El violín pertenece a la familia de las cuerdas, específicamente, a la de cuerda frotada debido al rozamiento de su arco sobre las cuerdas. Las partes principales se muestran en la **Figura 43**, siendo la de nuestro interés principal, las clavijas. Poseen 4 cuerdas, aunque existen violines eléctricos con 5 cuerdas pero que no abordaremos en esta investigación debido a que se trabajara con violines de aprendizaje inicial y siempre poseen 4 cuerdas.

Coincido con la definición de Silvela (2003), que afirman lo siguiente:

“El violín es uno de los instrumentos musicales más perfectos. Tanto por su versatilidad como por su atrayente musicalidad, está a la cabeza de todos los instrumentos. El violín es, se ha dicho muchas veces, otra voz humana, su modelo, y en este sentido puede reproducir todo tipo de estados de ánimo y, dependiendo de la habilidad del intérprete, puede ir desde lo más triste y pesadumbroso a lo más alegre, pasando por todos los estados intermedios”. (p. 17)

Figura 43

Partes del violín, vista frontal y lateral de todos sus componentes



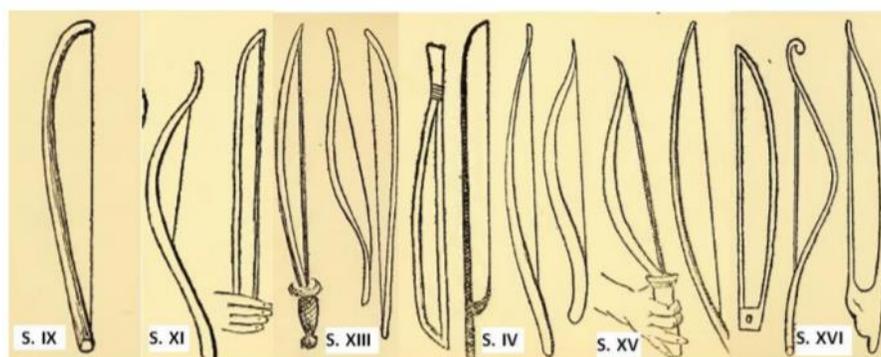
Nota. El gráfico representa las partes internas y externas de un violín incluidos los accesorios y el arco. Recuperado de <https://images.app.goo.gl/ngZi4TeTcWjjWewq6>

Arco de violín. Los violines vienen siempre acompañados de su arco que tienen una evolución bastante extensa, pero fue hasta el siglo XVIII cuando Tourte creó el arco que se utiliza actualmente. (Alcarria, 2017)

Entre sus antecesores se puede observar en la **Figura 44**, como ha ido evolucionando al transcurrir los años y como cada uno producía un sonido diferente debido a la distribución de la fuerza, fíjese en la **Figura 45**:

Figura 44

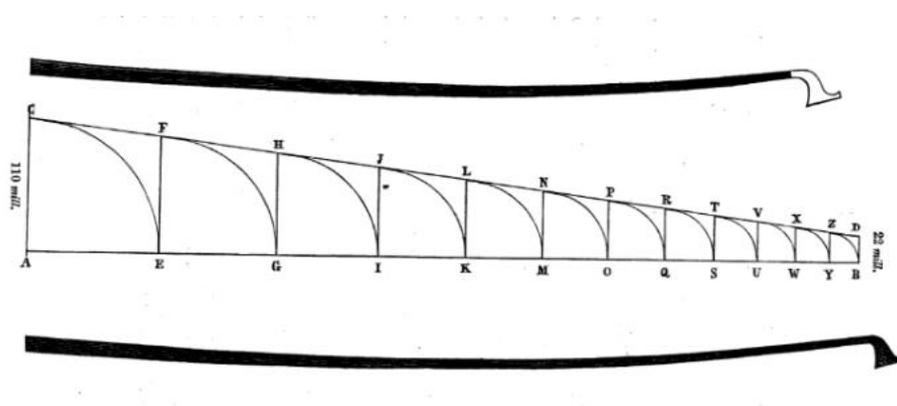
Evolución del arco del violín a través de los siglos



Nota. Recuperado de Aguirre, (2016), p. 8 – 12.

Figura 45

Distribución de la fuerza en el arco del violín actual diseñado por Tourte



Nota. Recuperado de Fétis, F. J. (1864), p. 122.

Tamaño de los violines. Los violines vienen en tamaños de cuatro cuartos (4/4), siendo este el violín de tamaño normal y profesional usado en las orquestas sinfónicas, para estudio y estudiantes existen tamaños más pequeños como el tres cuartos (3/4), un medio (1/2) y un octavo (1/8), existen violines más pequeños que este, pero son confeccionados de manera especial.

Los tamaños de violines se deciden por la extensión del brazo izquierdo del instrumentista hasta topar con el caracol, si este no llega a topar se debe adecuar hasta el tamaño respectivo de violín. En la **Tabla 3**, se puede observar un resumen:

Tabla 3

Longitud en centímetros del violín y la edad recomendada según la edad del estudiante

Tamaño del Violín	Longitud máxima [cm]	Edad recomendada [años]
Un – octavo (1/8)	48	Menos de 8
Un – medio (1/2)	53	8 – 11
Tres – Cuartos (3/4)	58	12 – 15
Cuatro – Cuartos (4/4)	61	Mayor a 15

Afinación de las cuerdas de un violín

El violín acústico que se usa comúnmente tiene 4 cuerdas las cuales se ordenan desde la más fina hasta la más gruesa de la siguiente manera:

Primera cuerda o cuerda de MI. Esta cuerda posee una frecuencia de **659.26 Hertzios**, es la nota número cinco ($n=5$) en la quinta octava ($x=5$).

Segunda Cuerda o cuerda de LA. Esta cuerda posee una frecuencia de **440.00 Hertzios**, es la nota número diez ($n=10$) en la cuarta octava ($x=4$). Es también la nota utilizada para afinar al violín y a otros instrumentos como la voz humana, por ejemplo.

Tercera Cuerda o cuerda de RE. Esta cuerda posee una frecuencia de 293.66 Hertzios, es la nota número tres ($n=3$) en la cuarta octava ($x=4$).

Cuarta Cuerda o cuerda de SOL. Esta cuerda posee una frecuencia de 196.00 Hertzios, es la nota número ocho ($n=8$) en la tercera octava ($x=3$).

Clavija

Es la parte del violín donde se utiliza para afinar el instrumento, cada cuerda está atada a una clavija determinada, la cual tiene una forma cónica para realizar un ajuste en el mango o caracol del violín y de esa manera estirar las cuerdas del violín y que las mismas no retrocedan debido a la tensión de las cuerdas. En la **Figura 46**, se puede observar su forma y como entran estas en el violín para obtener la afinación adecuada:

Figura 46

Clavijas y clavijero del violín.



Nota. El gráfico representa la forma de las clavijas y como se insertan en el clavijero para ajustar cada cuerda. Recuperadas de <https://images.app.goo.gl/fy9KZXBms7agYwov7>

Encoder Efecto de Hall (Codificador)

El encoder efecto de hall comparado con su alternativa el encoder óptico obtuvo buenos resultados e inclusive mejores como lo demuestra la investigación de D. Rapos, C. Mechefske y M. Timusk, (2016).

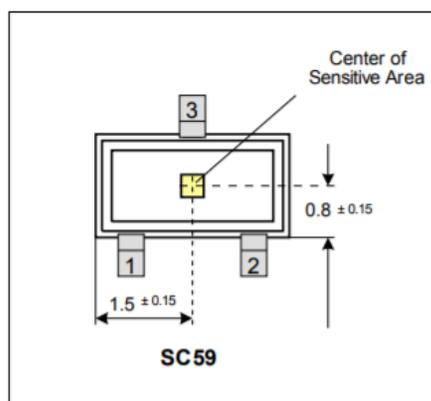
Este encoder no necesita de una buena iluminación del ambiente como es en el otro caso e inclusive soporta algunas otras variaciones de mejor manera que el encoder óptico.

Características. En el mercado existen diferentes sensores de efecto de Hall. Uno por ejemplo es el sensor TLE4946-2K del fabricante Infineon, el cual puede operar hasta temperaturas de 150° C, posee protección de polaridad y soporta hasta los 18 V. Da como salida una señal digital y lo vende en una cápsula SMD.

Este chip está integrado dos veces a una pequeña placa que gracias a un disco magnético que gira con el eje del motor y cuando pasa por cada polo, Norte y sur en su centro de sensibilidad manda una señal de salida que es captada por el osciloscopio o en este caso por un microprocesador. En la **Figura 47**, se puede apreciar mejor sus pines y su área sensible:

Figura 47

Funcionamiento del sensor de Efecto de Hall y su configuración de pines.



Pin or Ball No.	Name	Pin Type	Function
1	Vs	I	Supply voltage
2	Q	O	Output
3	GND	I	Ground

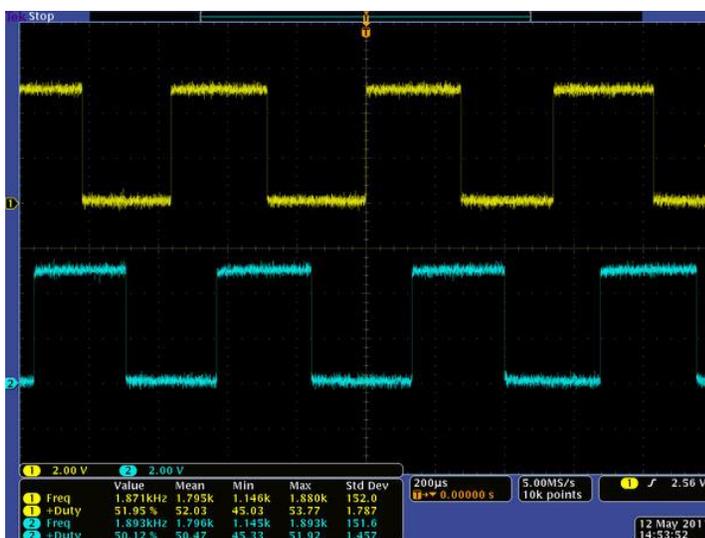
Nota. Recuperado de <https://www.pololu.com/file/0J815/TLE4946-2K.pdf> (2021, p. 6).

Funcionamiento. El funcionamiento de un Encoder efecto de hall es como lo muestra la **Figura 48**, en donde el sensor dispone de tantos pulsos (pueden ser 12 48 o 64), también llamado pulsos por revolución o en siglas CPR, para realizar una vuelta completa, en el caso de los motores; este conteo se lo debe multiplicar por la relación de engranajes que tenga el motorreductor y se obtendrá el número de pasos reales que debe contar el sensor para dar una vuelta completa.

Según el programador se puede obtener los flancos de subida y de bajada o el cambio de estado que es el más comúnmente usado para aprovechar al máximo los conteos por revolución (CPR) que tenga el encoder y tener una mejor resolución que será directamente proporcional al control que se vaya implementar.

Figura 48

Funcionamiento de un encoder en su salida digital



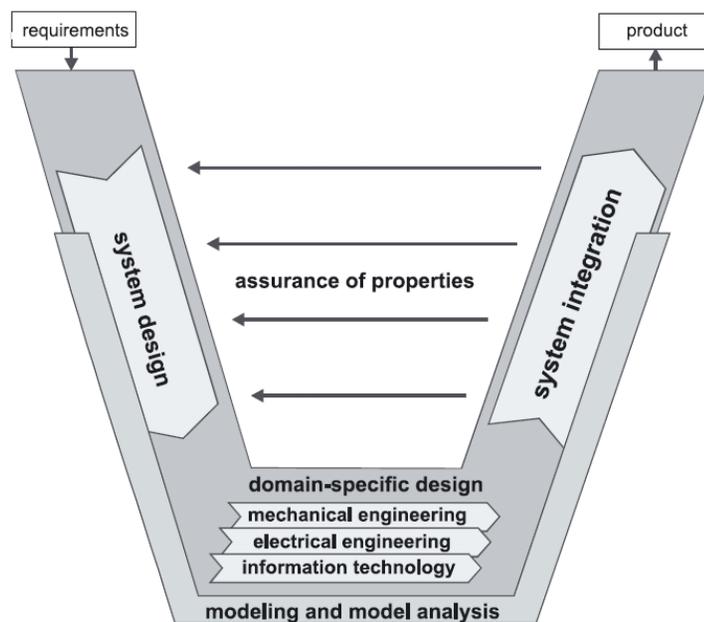
Nota. El gráfico representa las señales obtenidas de un osciloscopio a la salida del sensor encoder magnético el cual nos dice su funcionamiento cada vez que pasa lectura por el sensor. Salidas encoder A y B para motorreductor metálico 25D mm HP 6V con encoder 48 CPR (motor funcionando a 6 V). Recuperado de <https://www.pololu.com/product/4808> (2021).

Capítulo III: Diseño mecatrónico

El desarrollo del sistema se lo realizó siguiendo el modelo en V de la metodología de diseño para sistemas mecatrónicos correspondiente a la norma VDI 2206, se dividió el desarrollo del mismo en tres bloques principales, los cuales son: diseño del sistema, diseño de dominio específico e integración del sistema, como se muestra en la **Figura 49**:

Figura 49

El modelo en V correspondiente a la norma VDI 2206



Nota. Recuperado de “New guideline VDI 2206 – A flexible procedure model for the design of mechatronic systems”, de *Gausemeie, J., & Moehringer, S.*, 19 de agosto, 2003. Recuperado de <https://pdfs.semanticscholar.org/b546/e7bd3c007d5ab40e9a8e5ca8d0b2ffa8b22d.pdf>

Diseño del sistema.

Requerimientos de diseño.

Los requerimientos solicitados y presentados por el autor para la realización del presente proyecto, se encuentran descritos en la **Tabla 4**:

Tabla 4

Requerimientos del prototipo – Afinador automático para violín.

Número	Requerimiento	Característica principal	Característica secundaria
1	Robusto y que soporte caídas.	Material que soporte el manejo del motor y del usuario.	Material que resista impactos.
2	Tamaño pequeño.	No exceder los 30 cm de largo.	No exceder los 20 cm de ancho.
3	Fácil de usar – intuitivo.	Mínimo uso de pulsadores.	-
4	Bajo costo.	Productos que se encuentren en el mercado nacional.	-
5	Funcional.	Que logre afinar por lo menos las 3 primeras cuerdas de 4, que son las que más se rompen.	-
6	Que sea programado con Open Source.	Que utilice una programación abierta para posibles mejoras a futuro.	-

Nota. Esta tabla muestra los requerimientos del sistema.

También se requiere de una característica técnica muy importante, ya que cada tamaño de violín tiene un tamaño diferente de las clavijas, e inclusive varia muy poco en el mismo violín, se debe adaptar ese cambio de tamaño para que sea funcional a todo tamaño de violín.

Además, se pide de una pantalla para la correcta navegación en el sistema y uso adecuado del dispositivo por parte del usuario.

Por último, se necesita que el micrófono del dispositivo pueda captar el sonido directamente de la caja de resonancia del violín y no de las clavijas, para tener una mejor adquisición de datos y procesamiento de señales.

Propuesta de Sistema

Dado estos requerimientos, se trató de conseguir los materiales y sensores que existen actualmente en el mercado ecuatoriano, pero debido a una sobresaturación de la memoria del microprocesador que se iba a utilizar y a que los motores existentes en el mercado no abastecían el suficiente torque para poder mover las clavijas del violín, se tuvo que importar motores y un microprocesador más potente para la realización de este proyecto. Dicha propuesta fue aceptada y se procedió con el proceso de diseño de dominio específico del diseño concurrente.

Diseño de dominio específico

Sistema mecánico

Diseño del prototipo y selección del material de impresión 3D. Para la construcción del dispositivo se lo realizó en impresión 3D, gracias a la adquisición de una impresora 3D de bajo costo Ender 3 Pro, por lo que se procedió a elegir el material de impresión.

La impresora puede imprimir PLA y ABS con la condición de que se lo realice en una cámara cerrada por la condición de impresión del ABS.

Se seleccionó un material que tiene PLA y Fibras de carbono incorporado para soportar cargas mecánicas y se utiliza para prototipos funcionales.

Se diseñó dicha cámara con las medidas de 103x55x52 cm. Y cuyo espesor de la tabla mdf es de 1.5 cm. Dicha cámara encierra toda la impresora para la impresión del material ABS que también ayuda a la impresión del PLA pero que no es estrictamente necesario.

La estructura se presenta en la **Figura 50**, que se utilizó para la construcción del prototipo:

Figura 50

Cámara de la impresora 3D para imprimir ABS y diferentes tipos de PLA



Nota. Estructura construida en madera mdf de 1.5 cm de espesor y de dimensiones 103x55x52 cm. (largo x ancho x altura)

Diseño de la garra del dispositivo. Se procedió a diseñar diferentes prototipos con el método científico de prueba y error, llegando a un diseño final funcional que consta de solamente 5 partes, donde 3 de ellos son las tapas del principal, denominada pistola wii debido a que se basó en un diseño de una pistola de videojuegos para tener más ergonomía al momento de manipular el dispositivo y la última pieza muy importante

es la que encaja en los diferentes tamaños de las clavijas denominado garra. La garra se presenta en la **Figura 51**, acoplado al motor de giro:

Figura 51

Garra que en su interior posee diferentes tamaños para las diferentes clavijas existentes de violín



Nota. Garra acoplada al motor por medio de un acople hexagonal y tornillos. Pieza impresa en 3D en material PLA con Fibras de carbono marca Creality.

Las formas interiores se pueden apreciar en la **Figura 52**:

Figura 52

Formas interiores y garra que sirvió para el cálculo de la fuerza del motor



Nota. Impreso en PLA fluorescente marca Creality.

Para satisfacer el objetivo de hacerlo universal para todo el tipo de clavijas que existen en el mercado ecuatoriano, se procedió a medir las clavijas de todos los tamaños. Llegando a diseñar la garra de la **Figura 51**, que servirá para agarrar los diferentes tamaños de clavija, en anexos se detalla el plano de la pieza.

Se procedió a realizar un análisis estático de fuerzas para determinar los puntos más críticos al momento de girar las clavijas.

Análisis estático de las fuerzas necesarias para mover las clavijas. Se procedió a realizar la simulación para verificar los puntos más críticos al momento de girar las clavijas.

Para la simulación se necesitan valores de sus propiedades mecánicas que según Urresta (2020), nos brinda las siguientes propiedades mecánicas del PLA en la

Tabla 5:

Tabla 5

Propiedades mecánicas del PLA para la simulación

Propiedad	Valor en PLA	Valor en ABS	Unidad
Módulo elástico	10.11	7.62	GPa
Coefficiente de Poisson	0.334	0.36	N/D
Densidad de masa	999.32	992.281	Kg/m^3
Límite a tracción	35.91	23.16	N/mm^3

Nota. Esta tabla muestra los valores para la simulación del PLA y del ABS.

Por otra parte, Carrillo (2016), nos comenta la siguiente tabla que es una mezcla de PLA con fibras de carbono en la **Tabla 6:**

Tabla 6

Resultados de las pruebas de tensión de los compositos de PLA/fibra de carbono

Material	Módulo de Young (MPa)	Esfuerzo a ceder (MPa)	Esfuerzo en la ruptura (MPa)
PLA	467.77 ± 61.26	50.18 ± 2.46	46.30 ± 5.82
PLA5FCTQ	521.53 ± 48.83	45.89 ± 1.26	49.47 ± 5.05
PLA10FCTQ	605.92 ± 50.83	49.17 ± 0.57	50.68 ± 3.31
PLA15FCTQ	633.01 ± 68.52	46.13 ± 1.12	46.53 ± 7.85
PLA5FCTP	473.57 ± 15.06	49.44 ± 4.38	48.17 ± 5.91
PLA10FCTP	642.49 ± 62.55	51.67 ± 3.11	50.21 ± 1.9
PLA15FCTP	563.08 ± 69.74	53 ± 5.73	50.65 ± 4.75

Nota. Esta tabla muestra los resultados de las pruebas de tensión. Recuperado de Carrillo (2016).

Y, por último, Serna (2003), nos presenta las siguientes propiedades en la **Tabla**

7:

Tabla 7

Propiedades de polímeros utilizados como materiales de empaque

Polímero	Fuerza de Tensión (MPa)	Módulo de Tensión (GPa)	Temperatura Máx. Usada (°C)
LDPE	6.2 – 17.2	0.14 – 0.19	65
HDPE	20 – 37.2	-	121
PET	68.9	2.8 – 4.1	204
PS	41.3 – 51.7	3.1	78
PA	62 – 82.7	1.2 – 2.8	-
PP	33 – 37.9	1.1 – 1.5	121
PLA (L+)	40 – 60	3 – 4	50 – 60

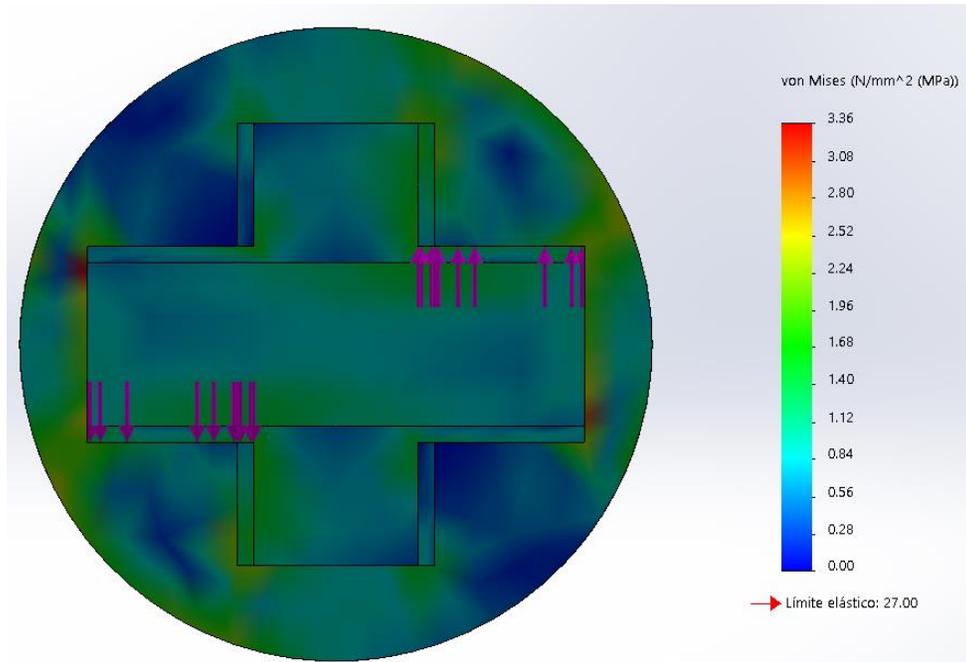
Nota. Recuperado de Serna (2003).

Por lo tanto, tomamos un promedio de 7 Gpa para el módulo elástico, 50 Mpa para la fuerza a tensión, 27 MPa como límite elástico, 0.334 para el coeficiente de

Poisson y la densidad de masa 999.32. Dando como resultado la siguiente simulación mostrada en la **Figura 53**:

Figura 53

Simulación de la carga de las clavijas sobre la garra impresa en 3D



Nota. Impreso en PLA con 15% de fibra de carbono marca Creality.

Diseño y selección del Motor Eléctrico. Para el cálculo de la fuerza necesaria para mover la clavija se hizo una prueba en todas las clavijas de todos los tamaños de violines obteniendo como fuerza máxima de fuerza 1.5 Kg, su distancia máxima de 7.3 cm dando como resultado 10.95 Kg.cm y agregando un margen de seguridad del 33% nos da como resultado 14.56 Kg.cm redondeando a 15 Kg.cm para mayor seguridad y no esforzar demasiado al motor.

Con el acople de la **Figura 52**, se realizó el cálculo de la fuerza de empuje necesaria tal como lo muestra la **Figura 54**:

Figura 54

Obtención del torque máximo

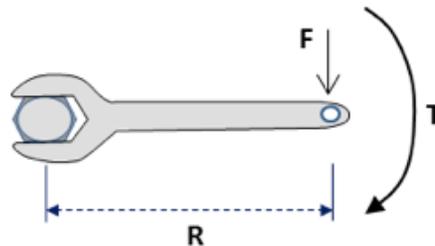


Nota. Se realizó el cálculo de la fuerza con una balanza digital con margen de error de 0.1 Kg y se construyó el prototipo con una distancia predeterminada de 7.3 cm.

Dicho cálculo se presenta a continuación, siguiendo el diagrama de fuerzas presentado en la **Figura 55**:

Figura 55

Fórmula del torque



$$T = F \cdot R$$

$$T = 1.5 \text{ Kg} \cdot 7.3 \text{ cm}$$

$$T = 10.95 \text{ Kg} \cdot \text{cm}$$

Se agrega un margen de seguridad del 33%:

$$T_s = T + 0.33 \cdot T$$

$$T_s = 14.56 \text{ Kg} \cdot \text{cm} \approx \mathbf{15 \text{ Kg} \cdot \text{cm}}$$

Para dicho torque se buscaron las siguientes posibilidades de motores en el mercado ecuatoriano, pero ninguna cumplía con dicho torque, por lo que se tuvo que importar del extranjero un motor pequeño que tenga ese torque suficiente para mover las clavijas del violín y que además sea de fácil implementación y poder controlarlo, por lo que se realizó una matriz de selección que se muestra en la **Tabla 8**:

Tabla 8

Matriz de selección del motor de giro

Criterios de selección

Torque y Velocidad > Precio > Tamaño > Implementación

Criterios de selección

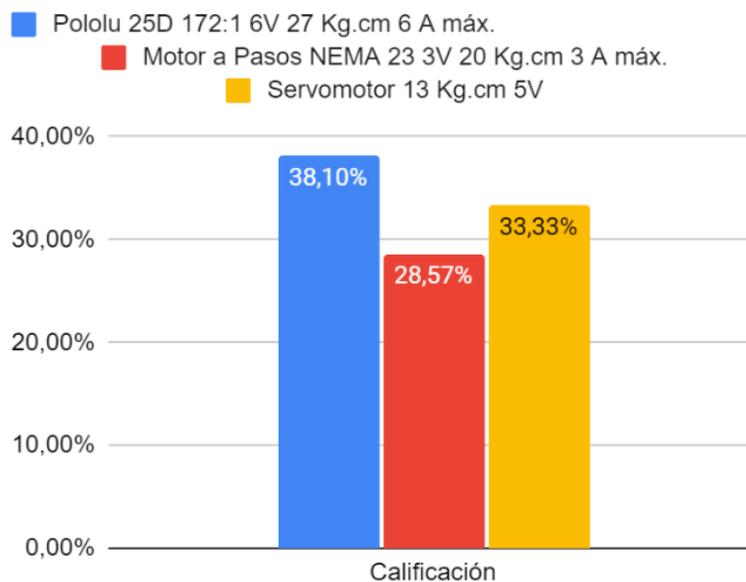
Criterio	Precio	Tamaño	Torque y Velocidad	Implementación	Σ +1	Ponderación
Precio	x	1	1	1	4	29%
Tamaño	1	x	1	0	3	21%
Torque y Velocidad	1	1	x	1	4	29%
Implementación	1	0	1	x	3	21%
Total					14	100%

Calificación de las alternativas 3 Lo mejor 1 lo peor

Alternativas	Precio	Tamaño	Torque y Velocidad	Implementación
Pololu 25D 172:1 6V 27 Kg.cm 6 A máx.	2	2	3	2
Motor a Pasos NEMA 23 3V 20 Kg.cm 3 A máx.	1	1	2	3
Servomotor 13 Kg.cm 5V	3	3	1	1
Σ	6	6	6	6

Calificación de las alternativas de acuerdo a la ponderación

Alternativas	Precio	Tamaño	Torque y Velocidad	Implementación	Calificación
Pololu 25D 172:1 6V 27 Kg.cm 6 A máx.	9,52%	7,14%	14,29%	7,14%	38,10%
Motor a Pasos NEMA 23 3V 20 Kg.cm 3 A máx.	4,76%	3,57%	9,52%	10,71%	28,57%
Servomotor 13 Kg.cm 5V	14,29%	10,71%	4,76%	3,57%	33,33%



Nota. Esta tabla muestra la comparación entre los diferentes motores que cumplen con el torque requerido siendo el Pololu 25D el de mejor opción.

El motor seleccionado es de la Marca Pololu con 25 mm de diámetro, el eje de salida en forma de D tiene 4 mm de diámetro y se extiende 12.5 mm desde la placa frontal de la caja de cambios, posee una caja de cambios con la siguiente relación exacta:

$$\frac{22 \times 20 \times 22 \times 22 \times 22 \times 22 \times 24}{12 \times 12 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10} = 171.7877333 : 1 \approx \mathbf{171.79 : 1}$$

Este motor cuenta con un encoder de 48 cuentas por revolución debido a su eje de salida de la caja de cambios, se multiplica por dicha relación, es decir:

$$CPR_{real} = CPR * Relación$$

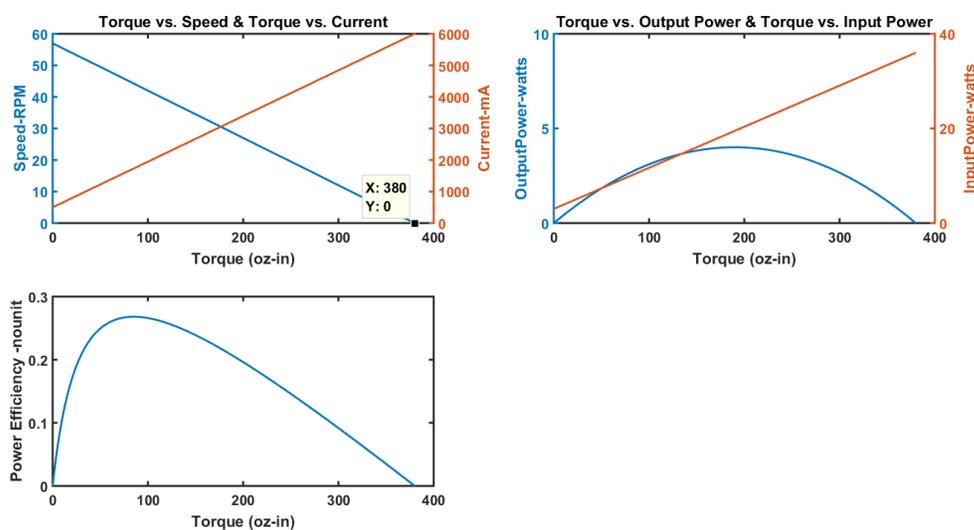
$$CPR_{real} = 48 * 171.7877333$$

$$CPR_{real} = 8245.8112 \approx \mathbf{8245.81}$$

Para el torque que este motor posee de acuerdo a su caja de cambios, nos ayudamos con un programa de Matlab del propio fabricante obteniendo los resultados mostrados en la **Figura 56**:

Figura 56

Cuadro de rendimiento del Motor Pololu 25D 172:1

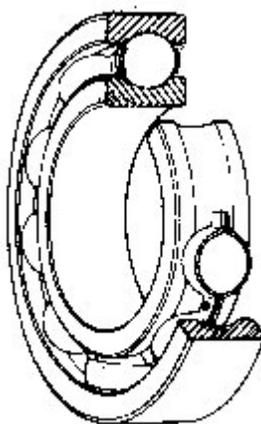


El gráfico mostrado tiene unidades de oz-in que 15kg.cm son 208.31 oz-in, dando como resultado los siguientes mostrados en la **Tabla 9**:

Tabla 9*Eficiencia del motor en 15 Kg.cm*

Característica	Valor
Torque	208.31 [oz-in]
Velocidad de giro	26.20 [RPM]
Corriente	2.5 [A]
Potencia de entrada	21.08 [Watts]
Potencia de salida	3.97 [Watts]
Eficiencia	0.19

Para evitar cargas axiales y descentramiento del eje, se utiliza un rodamiento de bolas rígido de dos tapas marca FBJ 6806-2RS que tiene 30 mm de diámetro, 42 mm de diámetro externo y 7 mm de profundidad. En la **Figura 57**, se puede observar el rodamiento utilizado:

Figura 57*Rodamiento 6806-2RS FBJ*

Nota. Recuperado de <https://www.fbj-bearings.com/products-detail.asp?series=1&cat=30&id=672>

Selección del Motor Lineal. Para la selección del motor lineal, se necesita calcular la fuerza necesaria de empuje que necesita una clavija de violín, se procedió a realizarlo con la misma balanza usada anteriormente para medir el torque, tal como se muestra en la **Figura 58**:

Figura 58

Medición de la fuerza de empuje de las clavijas del violín



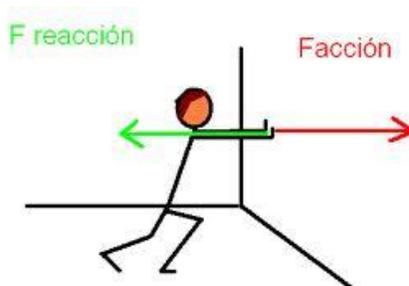
Nota. Se realizó el cálculo de la fuerza con una balanza digital con margen de error de 0.1 Kg y se construyó el prototipo con una distancia predeterminada.

Siguiendo la tercera ley de Newton que nos dice: “A toda acción corresponde una reacción de igual magnitud, pero en sentido contrario” esto se ejemplifica en la

Figura 59:

Figura 59

Ley Acción – Reacción



Nota. Recuperado de

http://3.bp.blogspot.com/_GpSXwrPgGIw/TIRMMgaCQVI/AAAAAAAAAFA/kp1H98QR1q/s1600/3ra+ley.jpg

Se procede a realizar la matriz de selección de dicho motor lineal en la **Tabla 10**:

Tabla 10

Matriz de selección del motor lineal

Criterios de selección

Tamaño > Torque y Velocidad > Precio > Implementación

Criterios de selección

Criterio	Precio	Tamaño	Torque y Velocidad	Implementación	Σ +1	Ponderación
Precio	x	1	0	0	2	25%
Tamaño	1	x	1	0	3	38%
Torque y Velocidad	0	1	x	0	2	25%
Implementación	0	0	0	x	1	12%
Total					8	100%

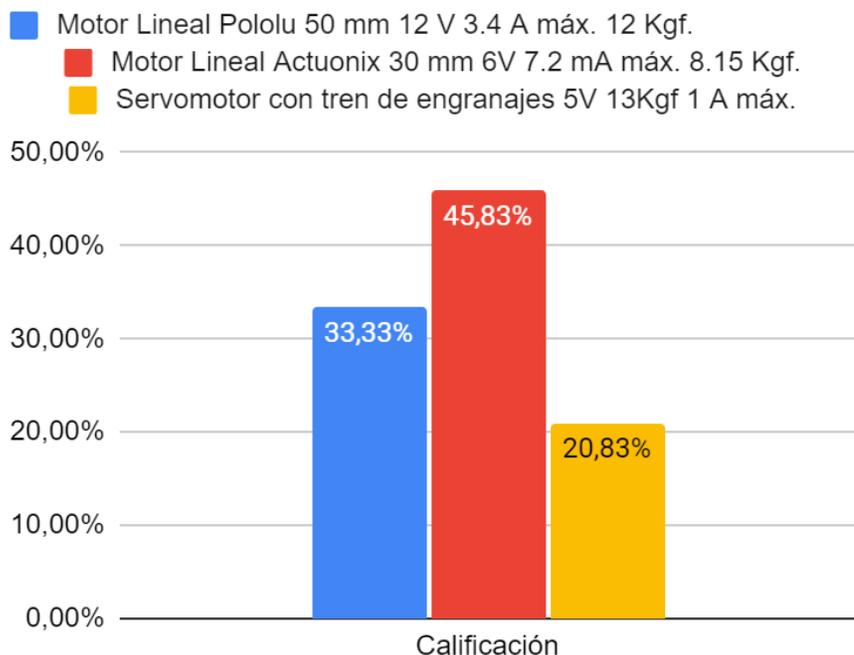
Calificación de las alternativas 3 Lo mejor 1 lo peor

Alternativas	Precio	Tamaño	Torque y Velocidad	Implementación
Motor Lineal Pololu 50 mm 12 V 3.4 A máx. 12 Kgf.	1	2	3	2
Motor Lineal Actonix 30 mm 6V 7.2 mA máx. 8.15 Kgf.	3	3	2	3
Servomotor con tren de engranajes 5V 13Kgf 1 A máx.	2	1	1	1
Σ	6	6	6	6

Calificación de las alternativas de acuerdo a la ponderación

Alternativas	Precio	Tamaño	Torque y Velocidad	Implementación	Calificación
Motor Lineal Pololu 50 mm 12 V 3.4 A máx. 12 Kgf.	4,17%	12,50%	12,50%	4,17%	33,33%
Motor Lineal Actonix 30 mm 6V 7.2 mA máx. 8.15 Kgf.	12,50%	18,75%	8,33%	6,25%	45,83%

Servomotor con tren de engranajes 5V 13Kgf 1 A máx.	8,33%	6,25%	4,17%	2,08%	20,83%
--	-------	-------	-------	-------	--------



Nota. Esta tabla muestra la comparación entre los diferentes motores lineales que cumplen los requisitos de selección siendo el Motor Lineal Actuonix 30 mm 6V el de mejor opción por sus 8.15 Kgf de empuje.

Diseño del prototipo funcional. Para desarrollar la ergonomía adecuada y que sea cómodo para el usuario, se partió de un diseño de pistola para Nintendo Wii, a partir de su estructura base se fue desarrollando el producto por medio del método científico de prueba y error, evolucionando como se puede observar en la **Figura 60**:

Figura 60*Evolución del prototipo*

Nota. Los planos del prototipo final se encuentran en anexos, los materiales utilizados para la impresión fueron PLA (1, 2 y 3) y ABS (4, 5 y 6), el prototipo final fue impreso en PLA con fibras de carbono.

Sistema Eléctrico

Selección del Microcontrolador. Para la selección del microcontrolador, se busca principalmente que sea el más pequeño, que su precio sea muy bajo, que su frecuencia de reloj y tamaño de memoria sea suficiente para ejecutar una FFT y los demás periféricos que se necesitan, y que su implementación y programación sea fácil de hacerla.

Por lo que se procede a realizar la matriz de selección en la **Tabla 11**:

Tabla 11

Matriz de selección del Microcontrolador

Criterios de selección

Tamaño > Precio > Frecuencia de Reloj > Implementación

Criterios de selección

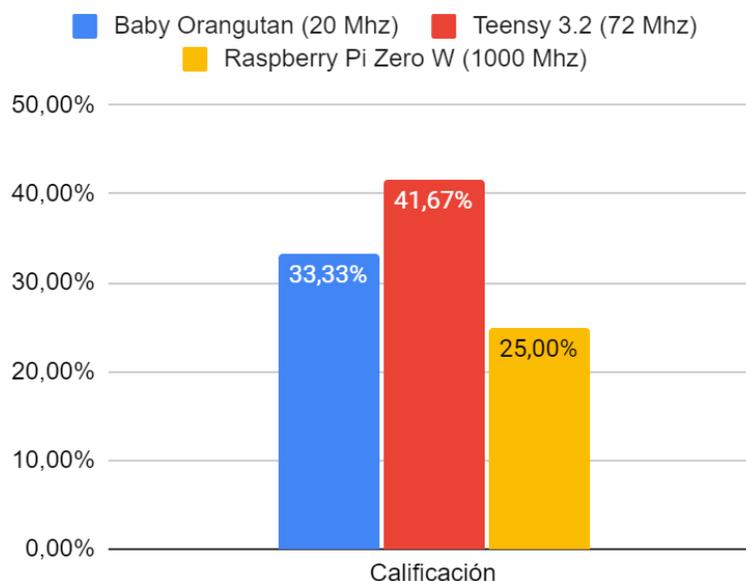
Criterio	Tamaño	Precio	Frecuencia de reloj	Implementación	Σ +1	Ponderación
Tamaño	x	1	1	1	4	33%
Precio	1	x	1	0	3	25%
Frecuencia de reloj	1	1	x	0	3	25%
Implementación	1	0	0	x	2	17%
Total					12	100%

Calificación de las alternativas 3 Lo mejor 1 lo peor

Alternativas	Tamaño	Precio	Frecuencia de Reloj	Implementación
Baby Orangutan (20 Mhz)	2	3	1	2
Teensy 3.2 (72 Mhz)	3	2	2	3
Raspberry Pi Zero W (1000 Mhz)	1	1	3	1
Σ	6	6	6	6

Calificación de las alternativas de acuerdo a la ponderación

Alternativas	Tamaño	Precio	Frecuencia de Reloj	Implementación	Calificación
Baby Orangutan (20 Mhz)	11,11%	12,50%	4,17%	5,56%	33,33%
Teensy 3.2 (72 Mhz)	16,67%	8,33%	8,33%	8,33%	41,67%
Raspberry Pi Zero W (1000 Mhz)	5,56%	4,17%	12,50%	2,78%	25,00%



Nota. Como Resultado de dicha matriz de selección el mejor microcontrolador es la Teensy 3.2 de 72 Mhz de Frecuencia de Reloj destacando sobre todo su tamaño y su fácil programación e implementación.

Selección del Micrófono. Para la selección del micrófono o sensor para la captación del sonido se pensó fundamentalmente en 4 criterios: Que su tamaño sea muy pequeño, que su implementación y acondicionamiento también sean fáciles de implementar, que su sensibilidad sea amplia para captar frecuencias bajas como altas y por último su precio en el mercado sea bajo.

Se procede a realizar la matriz de selección del micrófono en la **Tabla 12**:

Tabla 12

Matriz de selección del Micrófono

Criterios de selección

Tamaño > Implementación > Sensibilidad > Precio

Criterios de selección

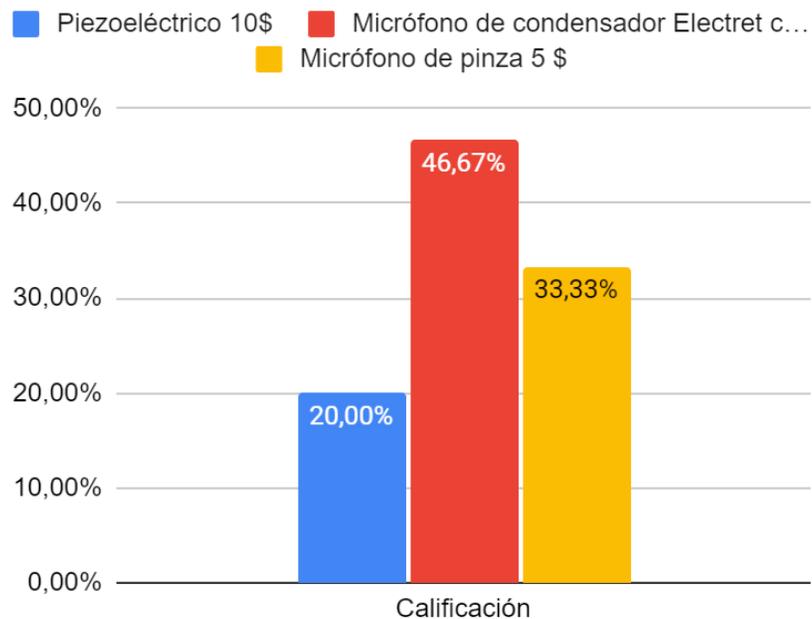
Criterio	Tamaño	Sensibilidad	Implementación	Precio	$\Sigma +1$	Ponderación
Tamaño	x	1	1	0	3	30%
Sensibilidad	1	x	0	0	2	20%
Implementación	1	0	x	1	3	30%
Precio	0	0	1	x	2	20%
Total					10	100%

Calificación de las alternativas 3 Lo mejor 1 lo peor

Alternativas	Tamaño	Sensibilidad	Implementación	Precio
Piezoeléctrico 10\$	1	2	1	1
Micrófono de condensador Electret con módulo 7 \$	3	3	3	2
Micrófono de pinza 5 \$	2	1	2	3
Σ	6	6	6	6

Calificación de las alternativas de acuerdo a la ponderación

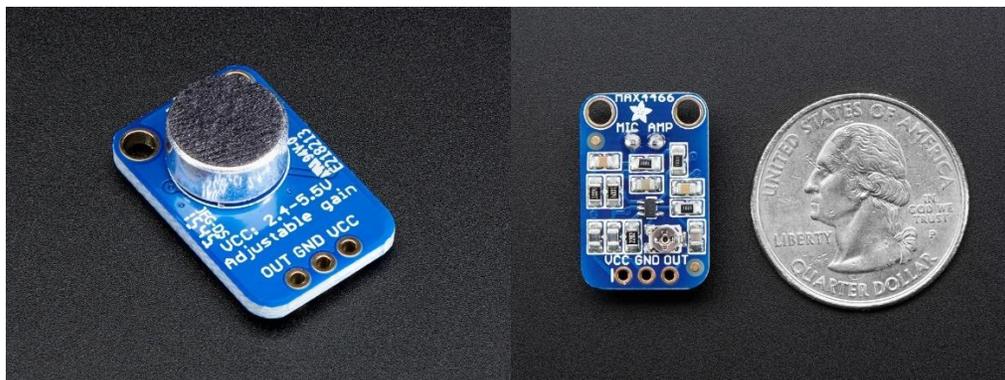
Alternativas	Tamaño	Sensibilidad	Implementación	Precio	Calificación
Piezoeléctrico 10\$	5,00%	6,67%	5,00%	3,33%	20,00%
Micrófono de condensador Electret con módulo 7 \$	15,00%	10,00%	15,00%	6,67%	46,67%
Micrófono de pinza 5 \$	10,00%	3,33%	10,00%	10,00%	33,33%



Obteniendo como mejor opción y resultado tenemos el micrófono de condensador Electret con módulo Max 4466, mostrado en la **Figura 61**:

Figura 61

Micrófono Electret MAX 4466



Nota. Recuperado de <https://www.adafruit.com/product/1063>

En la **Tabla 13**, se presentan sus características principales que nos servirán para el desarrollo de este proyecto.

Tabla 13

Características del micrófono Electret MAX 4466

Característica	Valor
Voltaje de alimentación	2.4V – 5V
Dimensiones	10mm x 15mm
Ganancia ajustable	25x – 125x
Número de pines	3 (OUT-GND-VCC)
Rango de Frecuencias	20Hz – 20KHz

Nota. Recuperado de <https://uelectronics.com/producto/max4466-amplificador-de-microfono-electret/>

Selección de la Pantalla. Para la selección de la pantalla, se determinaron los siguientes criterios: El criterio principal es que sea fácil de programar y su implementación, seguido de su tamaño que sea pequeño, su precio muy económico y, por último, pero no menos importante su resistencia a las caídas. Se procede a realizar la matriz de selección de acuerdo a estos criterios en la **Tabla 14**:

Tabla 14

Matriz de selección de la pantalla

Criterios de selección

Implementación > Tamaño > Precio > Resistencia a caídas

Criterios de selección

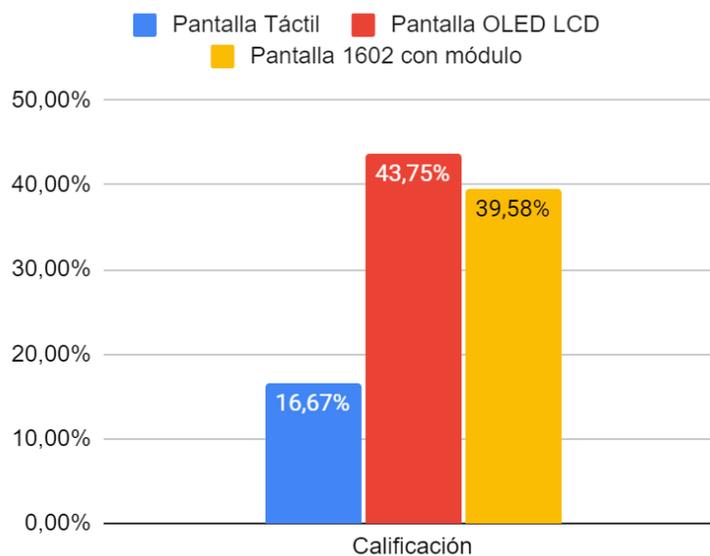
Criterio	Tamaño	Implementación	Resistencia a caídas	Precio	$\Sigma +1$	Ponderación
Tamaño	x	1	0	0	2	25%
Implementación	1	X	0	1	3	38%
Resistencia a caídas	0	0	x	0	1	12%
Precio	0	1	0	x	2	25%
Total					8	100%

Calificación de las alternativas 3 Lo mejor 1 lo peor

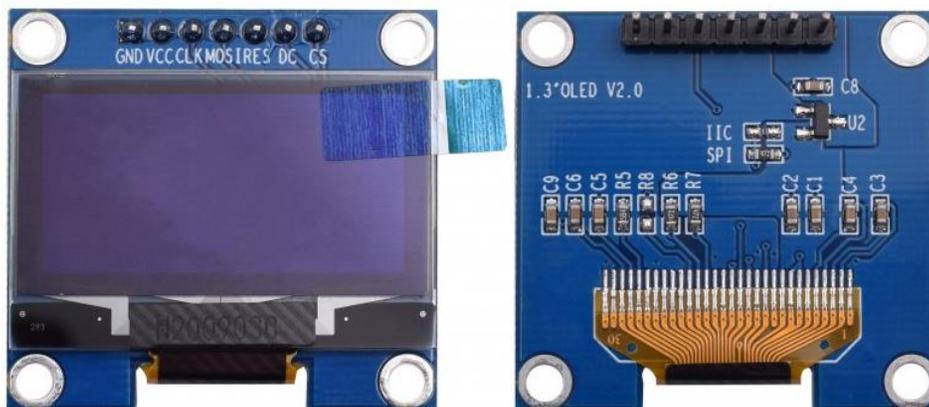
Alternativas	Tamaño	Implementación	Resistencia a caídas	Precio
Pantalla Táctil	1	1	1	1
Pantalla OLED LCD	3	3	2	2
Pantalla 1602 con módulo	2	2	3	3
Σ	6	6	6	6

Calificación de las alternativas de acuerdo a la ponderación

Alternativas	Tamaño	Implementación	Resistencia a caídas	Precio	Calificación
Pantalla Táctil	4,17%	6,25%	2,08%	4,17%	16,67%
Pantalla OLED LCD	12,50%	18,75%	4,17%	8,33%	43,75%
Pantalla 1602 con módulo	8,33%	12,50%	6,25%	12,50%	39,58%



Se obtuvo como mejor calificación a la pantalla OLED LCD destacando por su tamaño y su implementación o programación. La pantalla OLED viene de diferentes tamaños por lo que se escogió el que existe en el mercado ecuatoriano que es la OLED SH1106 que se ilustra en la **Figura 62**:

Figura 62*Pantalla OLED SH1106*

Nota. Recuperado de https://www.smart-prototyping.com/1_3-inch-OLED-Display-SH1106-SPI-I2C-128-64

En la **Tabla 15**, se presentan las características de esta pantalla que se utilizó de manera general, para más información consultar la página web oficial adjunta en la nota de la tabla o en anexos de la presente tesis:

Tabla 15*Características de la pantalla OLED SH1106*

Característica	Valor
Resolución	128 x 64
Tamaño de la PCB	35.4mm x 33.5mm
Voltaje de funcionamiento	3.3V – 5V
Corriente de funcionamiento	20 mA
Peso	5.7 g
Librería de funcionamiento	U8glib
Modos de funcionamiento	SPI/I2C (0X002 con cambio de resistencia)

Nota. Recuperado de https://www.smart-prototyping.com/1_3-inch-OLED-Display-SH1106-SPI-I2C-128-64

Selección de la Fuente de Energía (Batería). Actualmente, existen varias opciones en el mercado sobre las fuentes de energía portables, ya que no serviría con toma de corriente. El primer criterio es que abastezca el voltaje y los miliamperios por hora. Seguido por su Tamaño y peso; Su precio y por último su Implementación dentro del prototipo. Todos estos criterios son importantes para cumplir con los objetivos del proyecto, que sea portable, liviano y fácil de usar. En la **Tabla 16**, se muestra dicha selección de criterios:

Tabla 16

Matriz de selección de la fuente de energía (Batería)

Criterios de selección

MiliAmperio/hora y Voltaje > Tamaño y Peso > Precio > Implementación

Criterios de selección

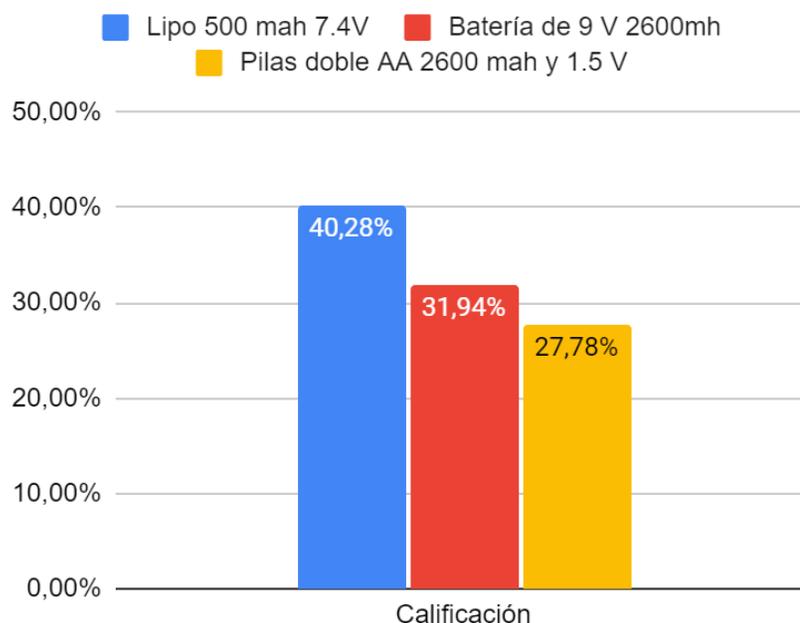
Criterio	Tamaño	Implementación	Resistencia a caídas	Precio	$\Sigma +1$	Ponderación
MiliAmperio/hora y Voltaje	x	1	1	1	4	33%
Tamaño y peso	1	X	0	1	3	25%
Implementación	1	0	x	0	2	17%
Precio	1	1	0	x	3	25%
Total					12	100%

Calificación de las alternativas 3 Lo mejor 1 lo peor

Alternativas	MiliAmperio/hora y Voltaje	Tamaño y peso	Implementación	Precio
Lipo 500 mah 7.4V Batería de 9 V	2	3	3	2
2600mh Pilas doble AA 2600 mah y 1.5 V	3	2	1	1
Σ	6	6	6	6

Calificación de las alternativas de acuerdo a la ponderación

Alternativas	MiliAmperio/hora y Voltaje	Tamaño y peso	Implementación	Precio	Calificación
Lipo 500 mah 7.4V	11,11%	12,50%	8,33%	8,33%	40,28%
Batería de 9 V 2600mh	16,67%	8,33%	2,78%	4,17%	31,94%
Pilas doble AA 2600 mah y 1.5 V	5,56%	4,17%	5,56%	12,50%	27,78%



Nota. Se selecciono la batería tipo Lipo por cumplir de mejor manera con los criterios de selección.

Se analizó en la **Tabla 17**, que produce el circuito:

Tabla 17

Suma de Corrientes TOTAL

Componente	Corriente (mA)
Motor Lineal	540
Motor Giratorio	1500
Pantalla OLED SH1106	20

Microcontrolador	250
Módulo Micrófono	20
Módulo Encoder	20
Módulo Regulador de Voltaje	20
Leds y Buzzer	80
TOTAL	2450

Lo que da como resultado un consumo de corriente de 2450 mA, la batería LIPO seleccionada tiene 500mAh con un coeficiente de descarga de 35C lo que nos da como resultado 17500 mAh disponibles, si lo dividimos para el total de corriente necesitada obtendremos aproximadamente cuántas horas duraría el dispositivo funcionando tal como se puede ver en la ecuación [22]:

$$\text{Duración de la batería} = \frac{\text{Corriente total de la batería}}{\text{Corriente necesaria}} \quad [22]$$

Por lo tanto:

$$\text{Duración de la batería} = \frac{17500 \text{ mA h}}{2450 \text{ mA}} = 7.14 \text{ horas} * \frac{60 \text{ min}}{\text{horas}} \approx 7 \text{ horas con 8 minutos}$$

Lo que nos da una duración total del dispositivo de 7 horas con 8 minutos aproximadamente.

Elaboración y fabricación de la PCB. Para la correcta conexión entre pistas de los diferentes componentes electrónicos, se procedió a realizar pruebas por separado de cada componente para luego saber cuántos pines eran necesarios y de que tipo, es decir, analógico o digital. Entendiéndose que un pin analógico recibe datos de 0 a 255 como entrada o salida y el digital simplemente posee dos estados, 1 y 0, o High y Low.

Dicho lo anteriormente mencionado, en la **Tabla 18**, se presentan todos los componentes y el pin de conexión que se necesita, de acuerdo a las especificaciones.

Tabla 18

Pines de conexión de acuerdo a las especificaciones de cada componente

Componente	Número de Pin	Configuración
Led Rojo Menos	0	Digital Pin
Led Azul Ok	1	Digital Pin
Led Rojo Más	2	Digital Pin
Botón 1 (Opción)	5	Digital Pin (PullUp)
In A Motor Giratorio	6	Digital Pin
In B Motor Giratorio	7	Digital Pin
OLED (RES)	8	Digital Pin
OLED (DC)	9	Digital Pin
OLED (SDA)	10	Digital Pin
OLED (SCL)	11	Digital Pin
Buzzer	12	Digital Pin
Botón 3 (Giro)	13	Digital Pin (PullUp)
Motor Lineal	14	Analog Pin (A0)
Micrófono	16	Analog Pin (A2)
SDA	18	Analog Pin (A4)
SCL	19	Analog Pin (A5)
Botón 2 (Enter)	20	Analog Pin (A6 - PullUp)
ENCODER (PWM)	21	Analog Pin (A7)
ENCODER (5)	22	Analog Pin (A8 - PWM)
ENCODER (6)	23	Analog Pin (A9 - PWM)
LIBRE	3	Tx
LIBRE	4	Rx
LIBRE	15	Analog Pin (A1)
LIBRE	17	Analog Pin (A3)

Todos los pines de la Teensy 3.2 son digitales con interrupción, algunos se pueden configurar como PWM y otros cómo analógicos, lo que da una gran versatilidad al momento de configurar las conexiones. Quedaron 4 pines libres, 2 de ellos se utilizan

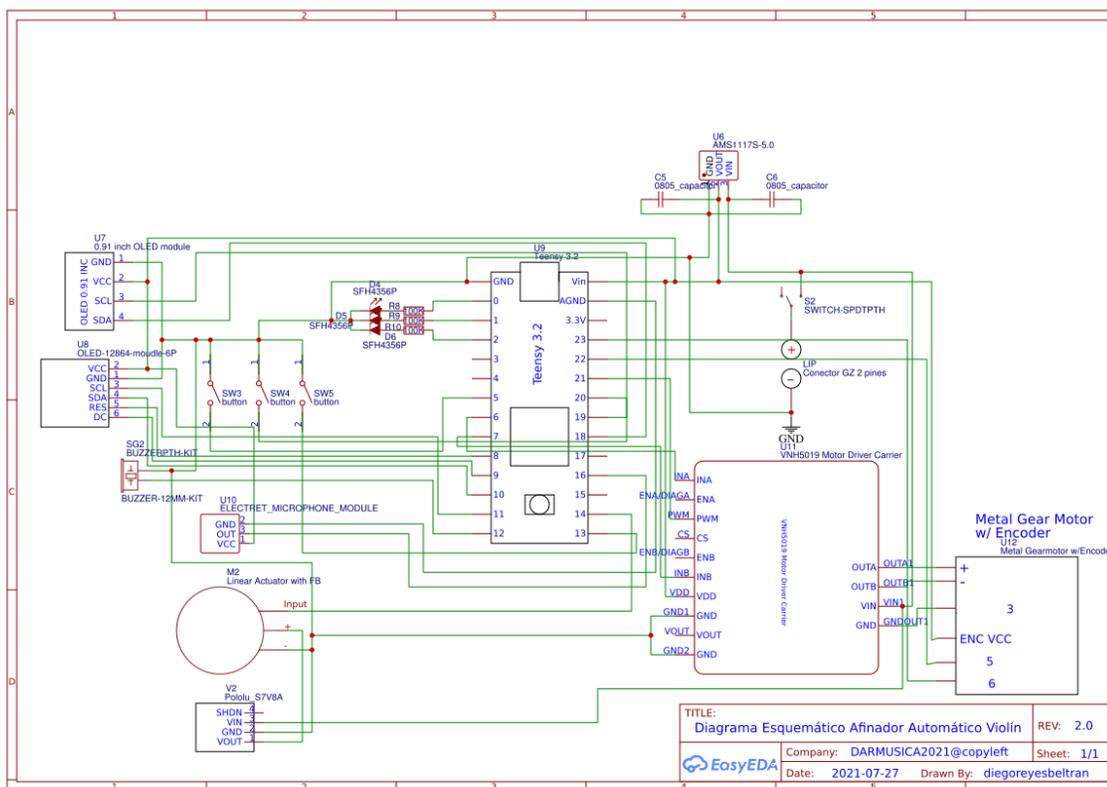
para la comunicación Serial Tx y Rx usados muy comúnmente para el módulo Bluetooth.

Luego de que se probó el funcionamiento de cada uno de los componentes conectados a los pines mostrados en la **Tabla 18**, se procedió a realizar el diagrama esquemático para su posterior fabricación en baquelita PCB:

Para la realización del esquemático se usó el software libre de internet EASYEDA que con una cuenta de Gmail se puede usar de forma gratuita. El esquemático se puede observar en la **Figura 63**:

Figura 63

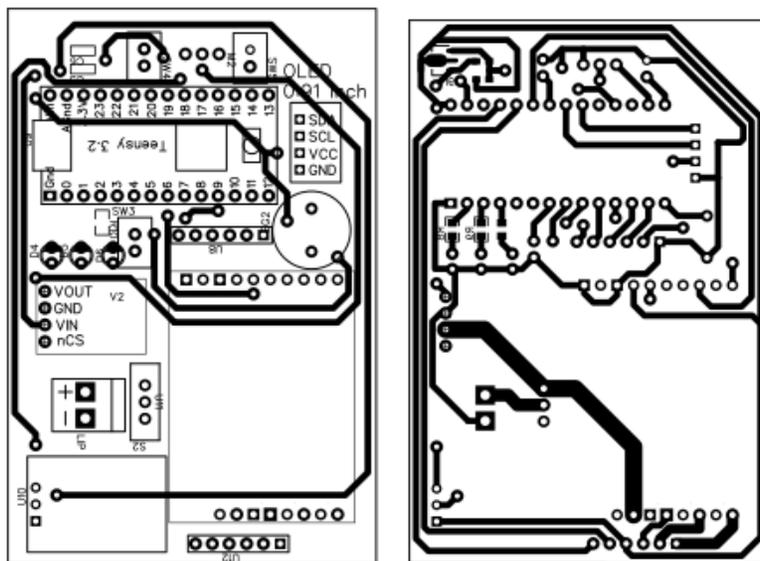
Diagrama Esquemático de la PCB



Luego se procedió a realizar las pistas de conexión tratando de utilizar máximo dos capas, debido al cruzamiento de cables entre los componentes quedando como se detalla en la **Figura 64**:

Figura 64

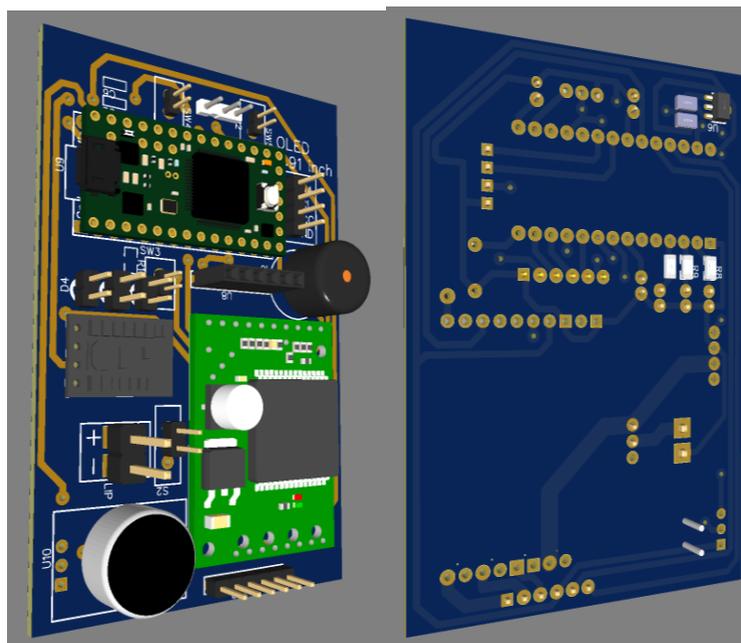
Diagrama de Conexión de la PCB. Capa superior e inferior



Y, por último, se realizó el diagrama 3D de la placa quedando como en la

Figura 65:**Figura 65**

Modelo 3D de la PCB



Sistema Informático

Programación del microcontrolador. Para la programación de una Teensy 3.2, se debe seguir los pasos descritos en su página oficial, www.pjrc.com/teensy y dar click en Getting Started, donde se indican los pasos a seguir de acuerdo al programa disponible instalado, en este caso se procedió a realizar la configuración para Windows con Arduino, como se puede observar en la **Figura 66**:

Figura 66

Encontrar el botón Getting Started en la página oficial



El primer paso es ver el funcionamiento de su LED Naranja al momento de conectar el cable USB a la placa de desarrollo, tal como lo muestra la **Figura 67**:

Figura 67

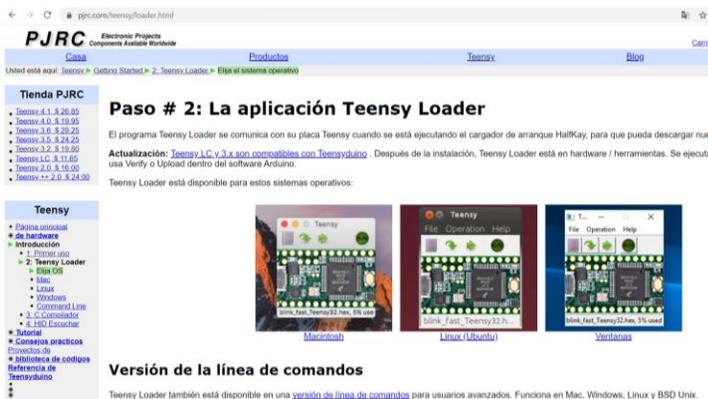
Paso 1: Primer uso de Teensy



Se procede a la instalación del programador virtual para el ARMCortex de la Teensy 3.2 como se puede verificar en la **Figura 68**:

Figura 68

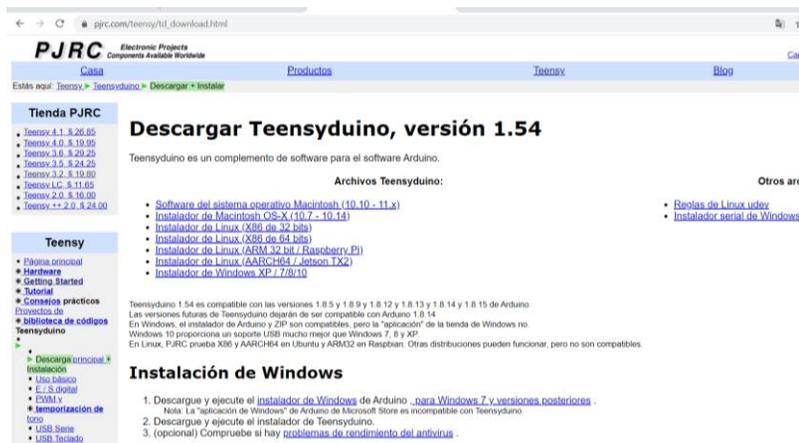
Paso 2: La aplicación Teensy Loader



Una vez instalada el programador virtual Teensy Loader, pasamos al compilador como tercer paso, aquí queda a libre elección del programador usar un compilador AVR del fabricante o, como la mayoría, usa el compilador Arduino, pero para que funcione con la teensy, necesitamos una librería que acopla el compilador Arduino con la placa de desarrollo, llamado teensyduino disponible solamente para las versiones 3.X o 4.X como se puede observar en la **Figura 69**:

Figura 69

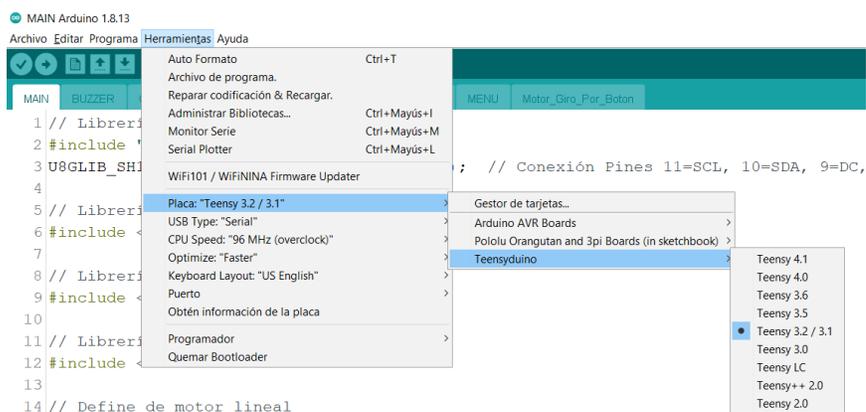
Paso 3: Compilador



Una vez instalado todos estos paquetes se procede a verificar con el programa Arduino abierto, la aparición de estas librerías exclusivas para Teensy 3.2 y, por supuesto, que se encuentre como dispositivo de selección al modelo de la Teensy como se puede observar en la **Figura 70**:

Figura 70

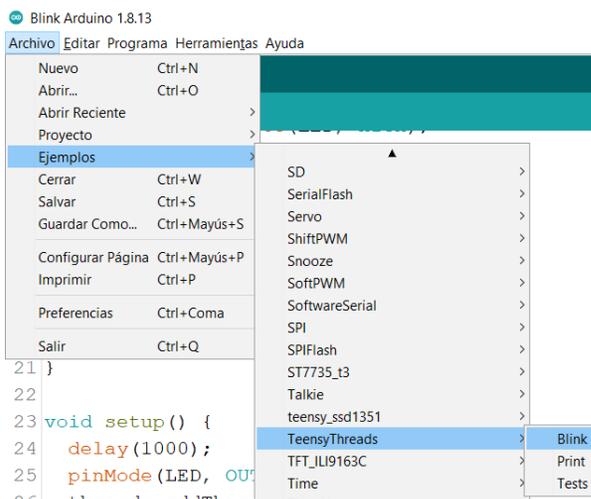
Verificación de instalación de paquetes Teensyduino



Una vez comprobado los paquetes seleccionamos un ejemplo de esta librería y probamos su funcionamiento, en la **Figura 71**, se detalla como seleccionar un ejemplo y probarlo:

Figura 71

Carga y prueba de un ejemplo para la teensy 3.2

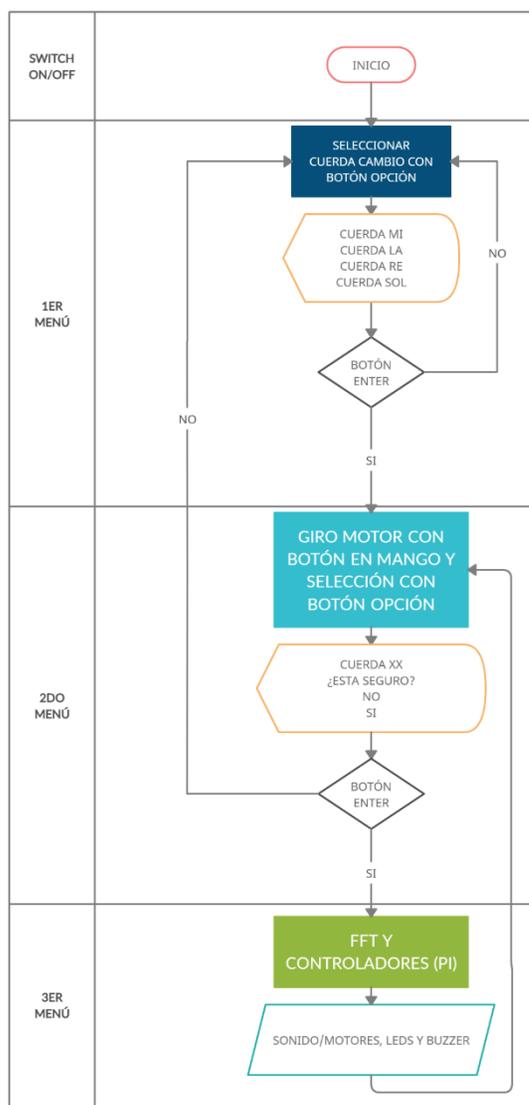


Entonces, se procede a verificar si el led que viene incorporado a la placa de desarrollo, parpadea cada segundo.

Diseño del programa de funcionamiento. Para la estructuración completa del programa se procedió a realizar un diagrama de flujo del sistema para mejor entendimiento del mismo, y al final del documento se presenta el código de programación completo, el diagrama se observa en **Figura 72** :

Figura 72

Diagrama de Flujo del Sistema Completo.



Con el diagrama de flujo bastante claro, procedemos a realizar el análisis de cada uno de los procesos, partiendo con el que definiría el controlador, la FFT.

Programación de la FFT. Para la obtención de la frecuencia a partir de un micrófono, se realizó varias investigaciones, por lo que se halló un autor que desarrollaba la FFT de forma simple y con el mínimo consumo de memoria.

El autor del algoritmo es Patel, Abhilash (2021), el cual optimizó al máximo su programación para obtener exactamente la nota que se esté tocando en ese instante de captación.

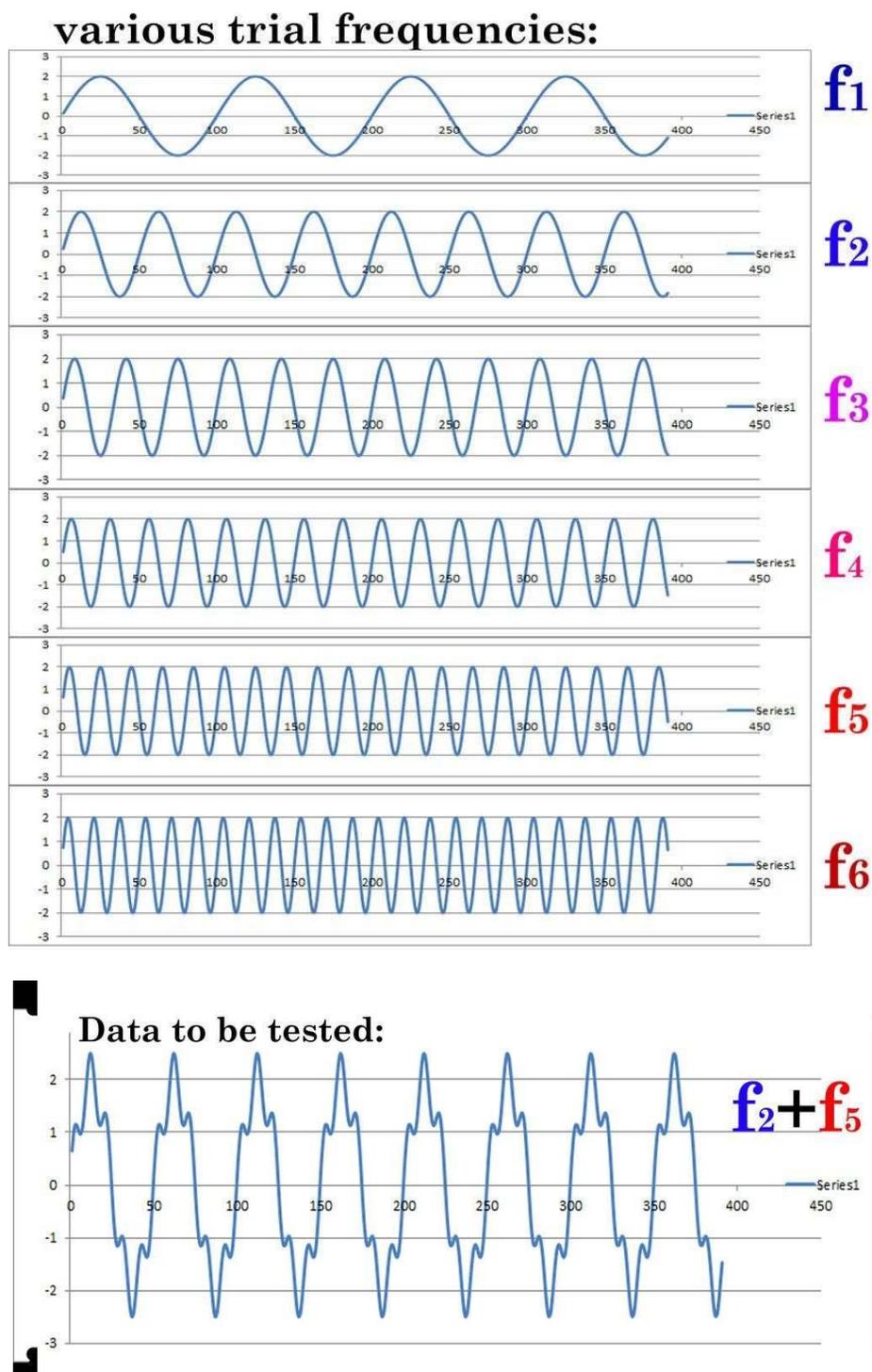
Se tomó de base esta lógica para poder obtener la frecuencia fundamental en hertzios, y que posteriormente, entraría al controlador de forma directa.

Para ello se tomó en cuenta únicamente la primera fundamental del grupo de vectores de la programación y se lo imprimiría en pantalla, obteniendo un error bastante grande, por lo que se procedió a cambiar los parámetros de entrada, como son, el número de datos recogidos y el tamaño de la muestra, cambiando de 128 a 256 ambos valores, reduciendo el error de la FFT considerablemente.

El algoritmo calcula constantemente el armónico fundamental y lo almacena en un vector de 5 posiciones, la posición que nos interesa en este caso es el que está en la posición 0, que tiene la mayor amplitud mediante la obtención de su suma de senos y cosenos.

En la **Figura 73**, se muestra una señal que es una combinación de dos frecuencias f_2 y f_5 :

Figura 73

Combinación de dos frecuencias f_2 y f_5 

Se puede demostrar matemáticamente que la suma de la multiplicación de dos conjuntos de datos armónicos que tienen una frecuencia diferente tiende a cero. En nuestro caso, si estas dos frecuencias tienen la misma frecuencia (o muy cercana), esa suma de multiplicaciones es distinta a cero.

Entonces, si nuestra señal se multiplica por f_1 , la suma de la multiplicación será cero (cerca de cero realmente). similar es el caso de f_3 con f_4 . Sin embargo, para el valor de f_2 y f_5 no será cero.

Aquí una señal se prueba con 5 frecuencias, por lo que la señal debe multiplicarse por cinco frecuencias. Matemáticamente se muestra que, para N número de muestras se necesitan $N * N$ multiplicaciones complejas.

Para hacer que el cálculo de DFT sea más rápido, James Cooley y John Tukey desarrollaron el algoritmo FFT. Este algoritmo también se considera como uno de los algoritmos más importantes del siglo XX. Divide una señal en una parte secuenciada par e impar, lo que reduce el número de cálculos necesarios. Al usarlo, la multiplicación compleja total requerida se puede reducir a $N \log N$.

El código implementado utiliza dos variables globales que reducen considerablemente el tiempo de ejecución, la primera es la de seno y coseno rápido, almacenándolo en una variable global tipo byte llamada `sine_data[]`, y la otra un vector de 5 posiciones, llamado `f_peaks[]`, donde se almacenan de forma descendente los armónicos procesados, `f_peaks[0]` contiene nuestra frecuencia fundamental y la que nos interesa en particular.

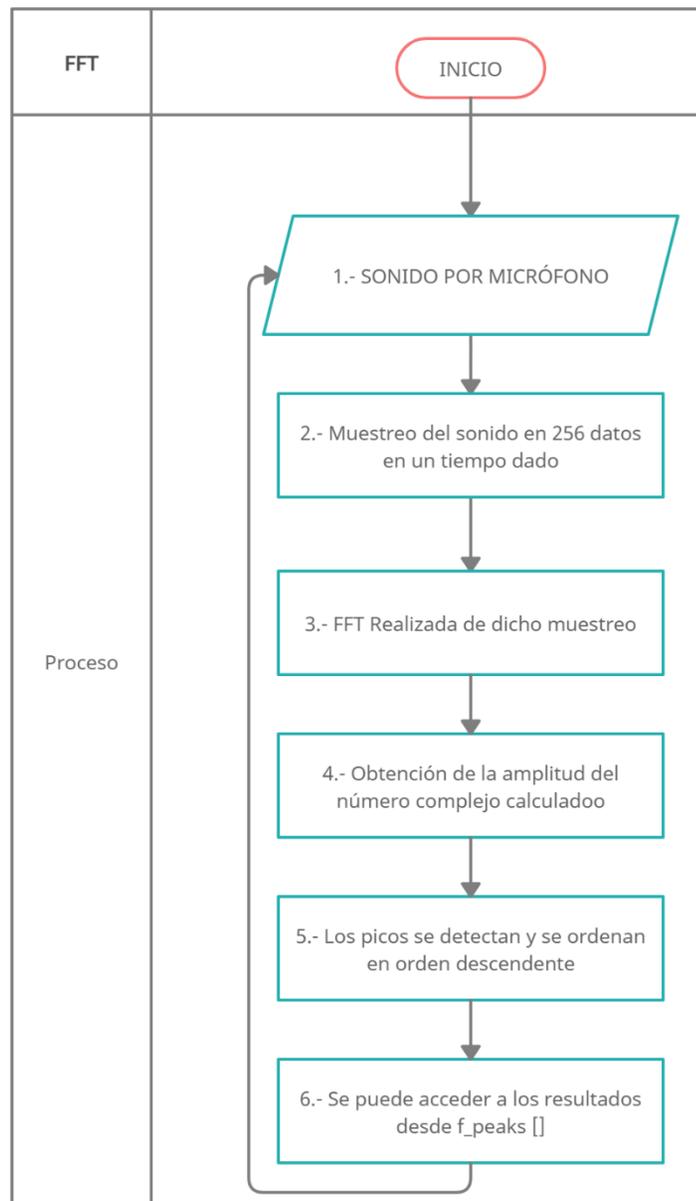
El código adjuntado en anexos FFT, funciona solamente con tamaños de muestra de 2^n . De acuerdo a que tan grande sea este valor, ocupará mayor memoria del microprocesador y aumenta la exactitud en el resultado.

Además, posee dos vectores de tipo flotante llamado *out_r* y *out_im* donde se almacenarán los datos de la parte real e imaginaria de la transformada, respectivamente.

El diagrama de flujo del programa es el presentado en la **Figura 74**:

Figura 74

Diagrama de flujo de la FFT

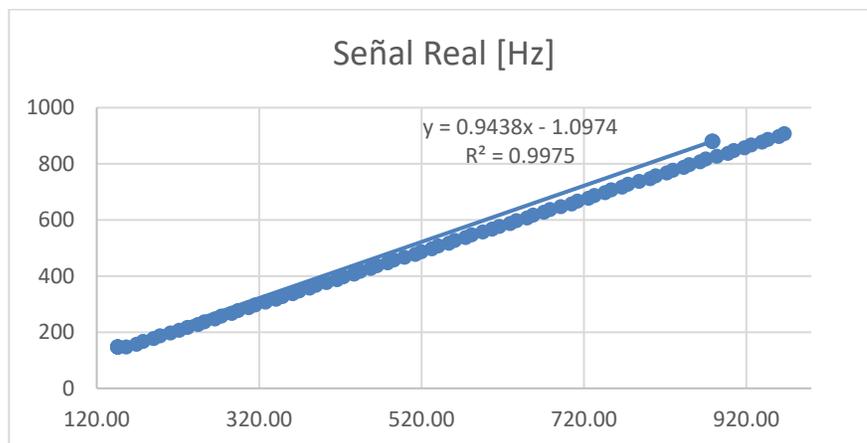


Debido a que la exactitud depende de su capacidad de memoria, se procedió a calcular el error para 128 muestras y 256 muestras, midiendo el valor teórico con el que nos daba la aplicación de la FFT.

En la **Figura 75**, se presenta la curva de ajuste con 128 muestras y 128 como tamaño de la muestra:

Figura 75

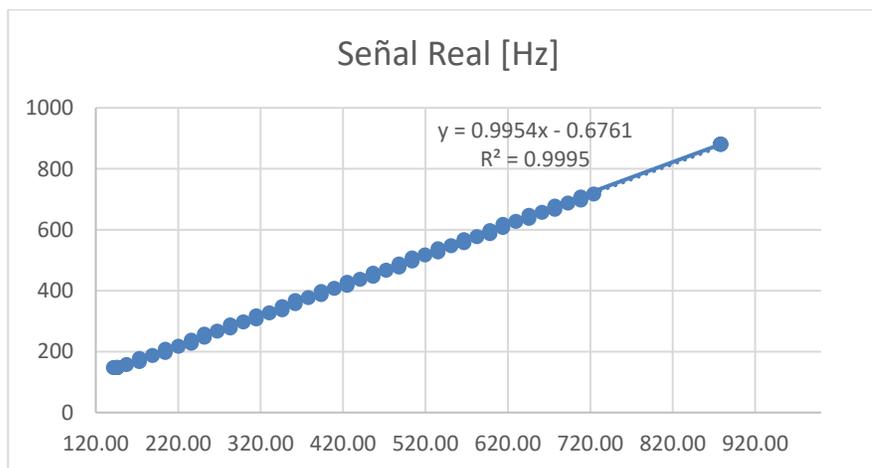
Curva de ajuste con 128 muestras y tamaño de la muestra de 128



A continuación, en la **Figura 76**, se muestra la curva de ajuste con 256 tanto de datos como de tamaño de la muestra:

Figura 76

Curva de ajuste con 256 muestras y tamaño de la muestra de 256



Cuya curva de ajuste es bastante aceptable quedando en la ecuación [23],
definida de la siguiente manera:

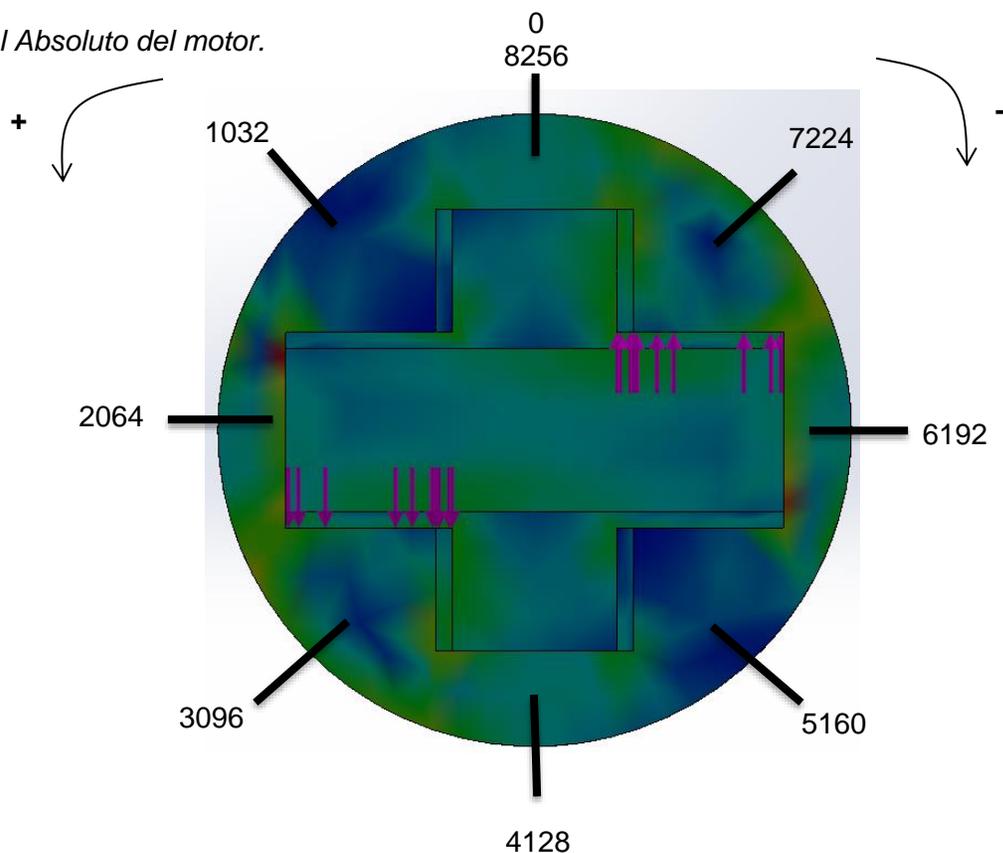
$$y = 0.9954x - 0.6761 \quad [23]$$

Resuelta esta parte de la FFT, se obtiene la frecuencia, con un error mínimo,
que nos ayudará para el correcto funcionamiento del controlador de la FFT.

Programación del controlador del motor. Debido a que el motor utilizado no es un servomotor, más bien es un motor de escobillas, se necesita controlar la posición de dicho motor con la ayuda de su encoder y un controlador de posición, es decir, que por cada 8256 pasos que cuente el motor, dará una vuelta completa y se procede a realizar las subdivisiones como se muestra la **Figura 77** :

Figura 77

Control Absoluto del motor.



Teniendo este controlador PI determinado por la ecuación [24]:

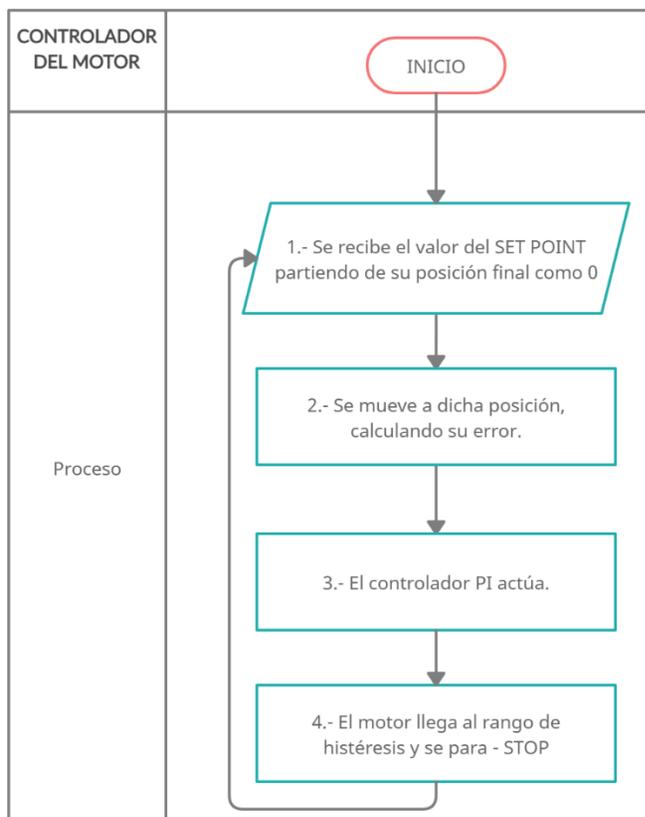
$$salidaM = kpM * erroM + kiM * integralerrorM \quad [24]$$

Una vez controlado el sistema, se realiza un mapeo para que los valores recibidos estén dentro de un rango determinado por la PWM del motor entre -130 a 130. Con esto nos aseguramos que el motor de pasos pequeños, pero con mucha fuerza de torque suficiente para girar las clavijas del violín, además debido a que la definición de pasos es muy pequeña, se realiza un control con histéresis de -10 y 10, para que el motor deje de mandar señal de PWM cuando esté dentro de este rango de error.

El diagrama de flujo del programa es el presentado en la **Figura 78**:

Figura 78

Diagrama de flujo del controlador del motor



Programación del controlador de la FFT. Ahora, una vez controlado el motor, necesitamos controlar la frecuencia de cada cuerda, y de acuerdo a su SET POINT de cada cuerda, mover el motor, ya sea para ajustar la cuerda o aflojarlo, hasta llegar a la frecuencia ideal de cada cuerda.

Para eso debemos definir el sentido para cada cuerda, ya que las clavijas de las 2 primeras cuerdas se encuentran al lado contrario que las otras 2 cuerdas más gruesas, es decir, se cambia el sentido de giro para ajustar y aflojar.

Procedemos a verificar si el signo del controlador anterior se encuentra bien para que cuerdas y para que otras cuerdas se deberían invertir.

Para ello, nos fijamos en la **Tabla 19**, descrita a continuación:

Tabla 19

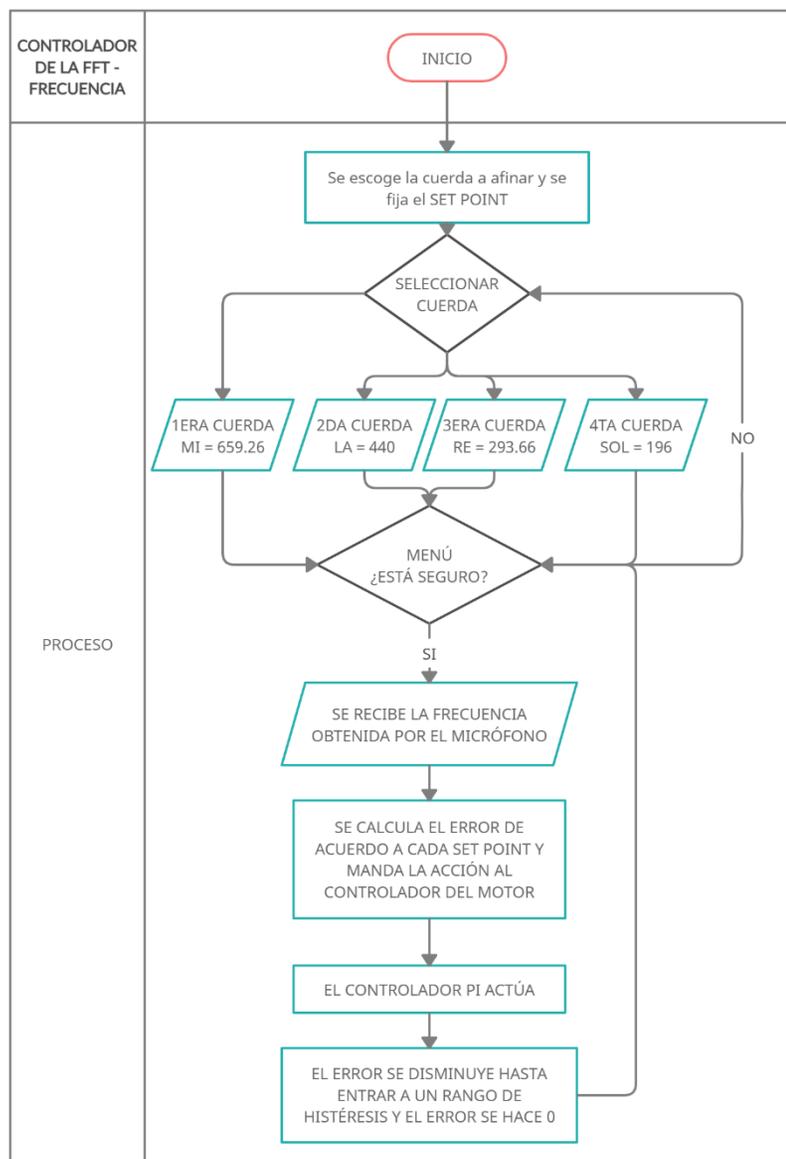
Configuración del controlador de la FFT para la frecuencia

Cuerda	Set Point [Hz]	Signo del Motor	Acción	Consecuencia	Conclusión
1ra Cuerda - MI	659.26	+	Ajusta	Sube Tono	INVERTIR SIGNO
2da Cuerda - LA	440	-	Afloja	Baja Tono	
3ra Cuerda - RE	293.66	-	Ajusta	Sube Tono	BIEN SIGNO
4ta Cuerda - SOL	196	+	Afloja	Baja Tono	

Con esto bastante claro, procedemos a realizar el diagrama de flujo del controlador de la FFT, es decir de la frecuencia en la **Figura 79**:

Figura 79

Diagrama de flujo del controlador de la FFT - Frecuencia



Debido a que las frecuencias leídas tienen una apreciación de 5 hertzios, posee igualmente un rango de histéresis entre -5 y 5, donde el controlador es igual a 0, y no manda ningún dato y el led ok se enciende, si el error es menor que -5, se prende el led menos y si es mayor que 5, se enciende el led más.

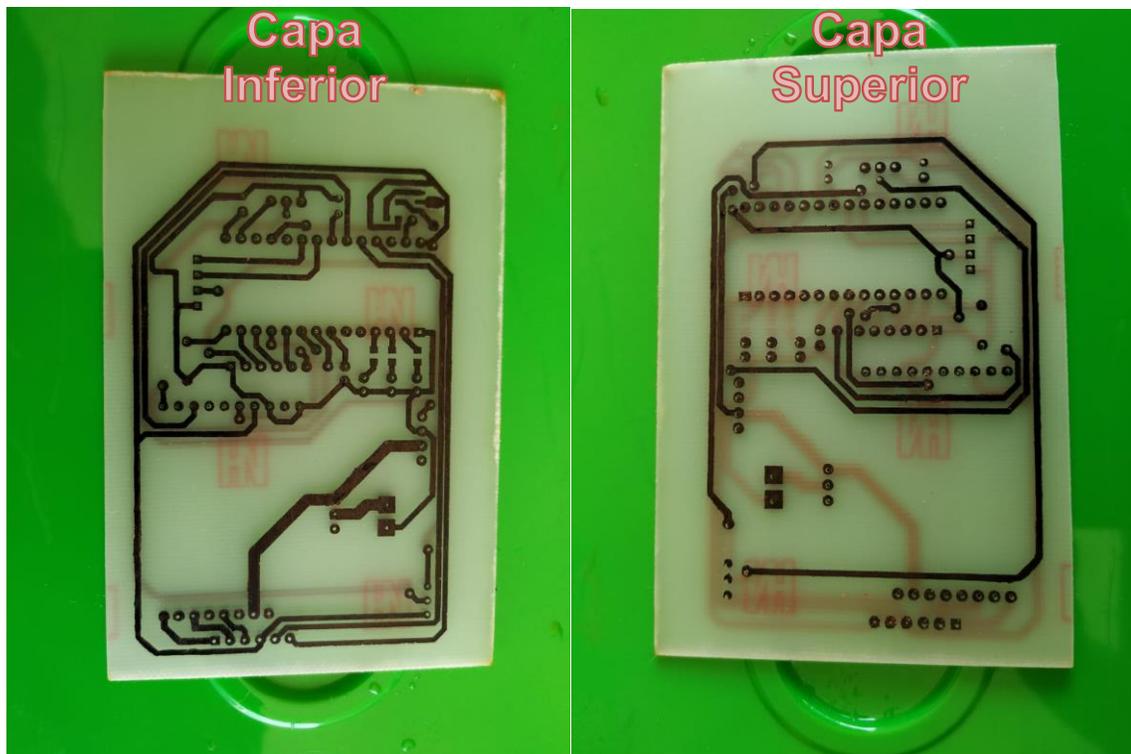
Integración del sistema

Soldadura de componentes

Se procedió a realizar la placa en PCB a doble cara, según el diseño propuesto, esta PCB fue hecha de manera artesanal, con plancha y ácido para baquelitas de lado y lado como se puede observar en la **Figura 80**:

Figura 80

Placa PCB a doble cara fabricada de manera artesanal



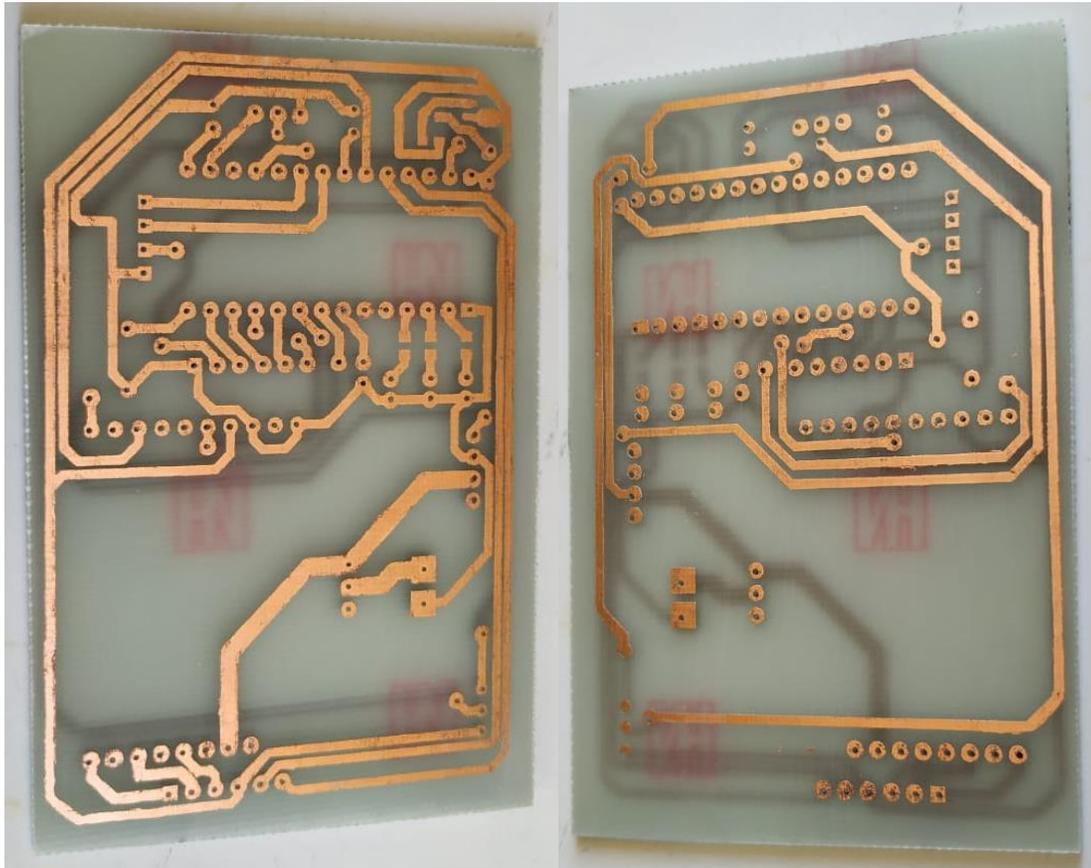
Una vez “quemada” la placa PCB, se procedió a cortar en las medidas que se necesitaban para que entre en el compartimiento del afinador. En la **Figura 81**, se muestra la placa limpia y cortada:

Figura 81

Placa limpia y cortada

Capa
Inferior

Capa
Superior



Una vez comprobado el tamaño de la placa, se procede a soldar los componentes, partiendo con los componentes SMD que tiene la placa, siguiendo por los pines hembra y macho y, por último, con el cable de la entrada de la batería.

Una vez soldada todos los componentes se procede a realizar una comprobación de las pistas y de que no haya cortocircuitos antes de mandar el voltaje de la batería y evitar dañar los componentes por un cortocircuito no previsto.

Unión de componentes

Lista la PCB, se procede a armar el dispositivo, imprimiendo cada uno de las 4 partes de la pistola, los tiempos que se demoraron cada uno se presenta en la nota de cada figura; Para todas las piezas se utilizaron la misma calibración de los parámetros de la impresora para este material especial descritas en la **Tabla 20**:

Tabla 20

Parámetros de impresión Cura 4.6.1 para el PLA con fibra de carbono

Parámetro	Valor
Altura de capa	0.16
Altura de capa inicial	0.12
Ancho de línea	0.4
Recuento de líneas de pared	3
Grosor superior/inferior	1.08
Patrón superior/inferior (Perímetro)	Líneas
Patrón de relleno	Cúbico
Porcentaje de superposición del relleno	30%
Anchura de retirada del forro	1.2
Temperatura de impresión	230 °C
Temperatura de la placa de impresión	110 °C
Velocidad de impresión	50.0 mm/s
Velocidad de pared	25.0 mm/s
Velocidad de desplazamiento	150.0 mm/s
Velocidad de capa inicial	20.0 mm/s

Velocidad de desplazamiento de la capa inicial	50 mm/s
Número de capas lentas	2
Habilitar Retracción	SÍ
Retracción en el cambio de capa	SÍ
Distancia de retracción	6 mm
Velocidad de retracción	34 mm/s
Desplazamiento mínimo de retracción	1.5 mm
Recuento máximo de retracciones	100
Activar refrigeración de impresión	SÍ
Velocidad del ventilador	80 %
Generar soporte	SÍ
Colocación del soporte	En todos sitios
Ángulo de voladizo del soporte	51
Patrón del soporte	Líneas
Recuento de líneas de pared del soporte	1
Densidad del soporte	10 %
Distancia de línea del soporte	4.0 mm
Grosor de la interfaz del soporte	1.28 mm
Patrón de la interfaz de soporte	Rejilla
Usar torres	SÍ
Diámetro de la torre	3.0 mm
Ángulo del techo de la torre	65 °

Tipo de adherencia de la placa de impresión	Balsa
Margen adicional de la balsa	7 mm
Cámara de aire de la balsa	0.2 mm
Capas superiores de la balsa	2 mm
Velocidad de impresión de la balsa	25.0 mm/s
Velocidad del ventilador de la balsa	0 %

Una vez configurada los parámetros de impresión se procede a imprimir cada uno de los componentes, empezando con la pistola mostrada en la **Figura 82**:

Figura 82

Impresión Pistola Afinador con 40% de relleno



Nota. Tiempo de impresión, 1 día, 19 horas, 35 minutos y 11 segundos.

La siguiente pieza a imprimirse fue la puerta de la pistola con las guías para la manguera que guiará el sonido al micrófono, esta se detalla en la **Figura 83**:

Figura 83

Impresión Puerta Pistola con 40% de relleno



Nota. Tiempo de impresión, 2 horas, 26 minutos y 22 segundos.

La siguiente pieza fue la garra para múltiples tamaños de clavijas, esta pieza fue hecha con un relleno del 100% debido a que es la pieza que entra en contacto físico directo con el instrumento, se detalla en la **Figura 84**:

Figura 84

Impresión Garra con 100% de relleno



Nota. Tiempo de impresión, 4 horas, 54 minutos y 54 segundos.

Por último, se imprimió la tapa de la batería, la cuál fue la más rápida y su densidad de relleno fue del 20%, debido a que no debe soportar mucha carga, se puede observar en la **Figura 85**:

Figura 85

Impresión Tapa Batería con el 20% de relleno



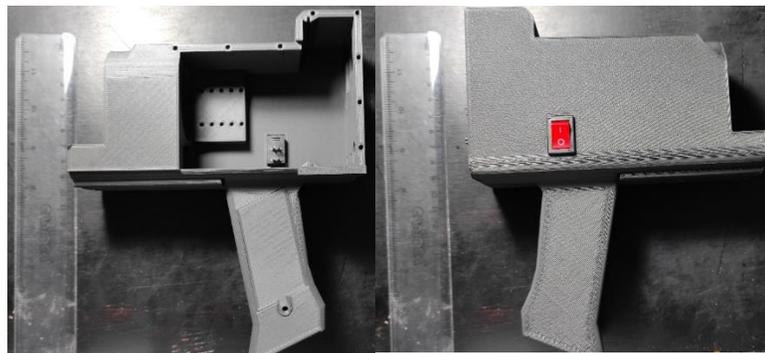
Nota. Tiempo de impresión, 1 hora, 14 minutos y 49 segundos.

Con las piezas construidas y listas para el ensamble se procedió a unir todos los componentes en el siguiente orden:

Luego de una limpieza profunda del material de apoyo de impresión y una pequeña lija para pulir porosidades, se procedió a colocar el switch de On/Off como lo muestra la **Figura 86**:

Figura 86

Unión Switch On/Off con el afinador



Una vez ensamblado esta parte del interruptor, se procede a realizar el ensamble del rodamiento para evitar descentramiento y cargas en el eje del motor, como se puede observar en la **Figura 87**:

Figura 87

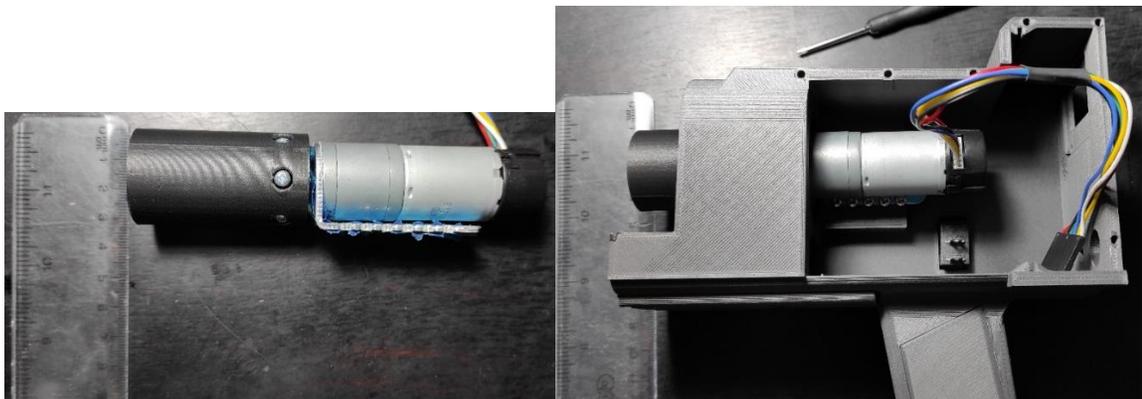
Unión Rodamiento con el afinador



Luego se procedió con el acople del motor con la garra y este fijarse en la base del afinador con los tornillos m3x8 como se puede observar en la **Figura 88**:

Figura 88

Unión Acople-Motor con el afinador

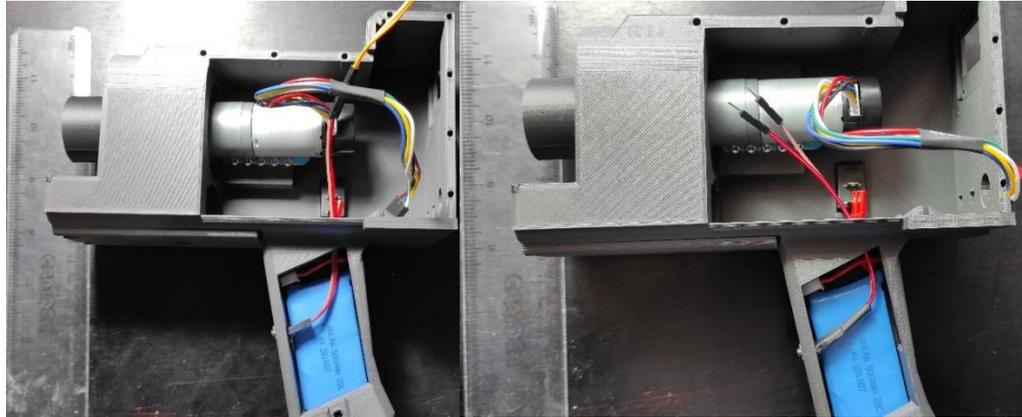


A continuación, se ubicó la batería en el compartimiento del mango con cable para conexión a la placa y, además, se ubicó el botón giro motor, como lo muestra en la

Figura 89:

Figura 89

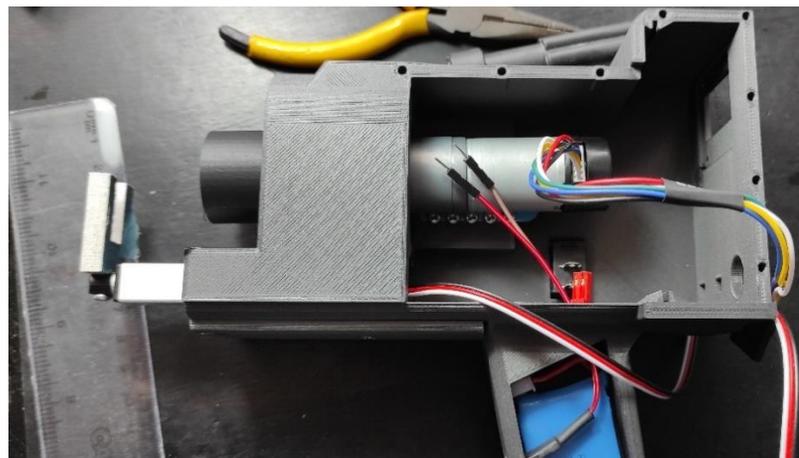
Ubicación batería del dispositivo en su compartimiento dedicado y botón giro



Luego se procedió con la ubicación del motor lineal, que servirá de empuje y agarre a las clavijas del violín. El diseño de la garra fue cortado a chorro de agua en una plancha de aluminio de 5 mm de grosor. Como se puede observar en la **Figura 90:**

Figura 90

Unión motor lineal a la pistola por medio de tornillos M4x15 sujetos en la parte inferior del prototipo



Se procedió con la ubicación de la pantalla OLED en la parte posterior del prototipo, se fijó con 4 tornillos M3x12 con tuerca. El diseño del prototipo tiene una muesca de entrada para que la pantalla entre completa y se pueda observar sin huecos o vacíos desde afuera, el último tornillo se colocó una vez puesta la placa en el prototipo, se refiere a la **Figura 91**:

Figura 91

Unión pantalla OLED con el prototipo por medio de 4 tornillos M3x12 con tuerca



Nota. El cuarto tornillo se puso una vez ubicada la placa en el compartimiento.

Al final, se ubicaron los botones de OPCIÓN y ENTER conjuntamente con la plaquita PCB del circuito, previamente revisada y testeada, se usaron cables flexibles para mejor acomodación y evitar rompimientos por la compresión del circuito dentro del afinador. Poniendo las tapas y la manguera que recibe el sonido, queda como en la **Figura 92**:

Figura 92

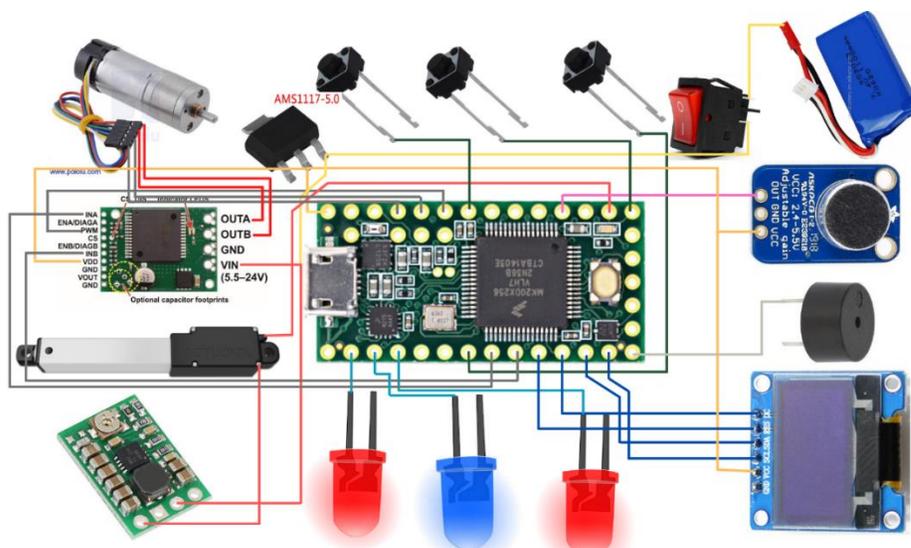
Afinador automático ensamblado totalmente



Para las conexiones del prototipo se presenta un resumen, el cual se puede observar en la **Figura 93**, el mismo que detalla todos los componentes conectados al microcontrolador para que responda a la correcta programación:

Figura 93

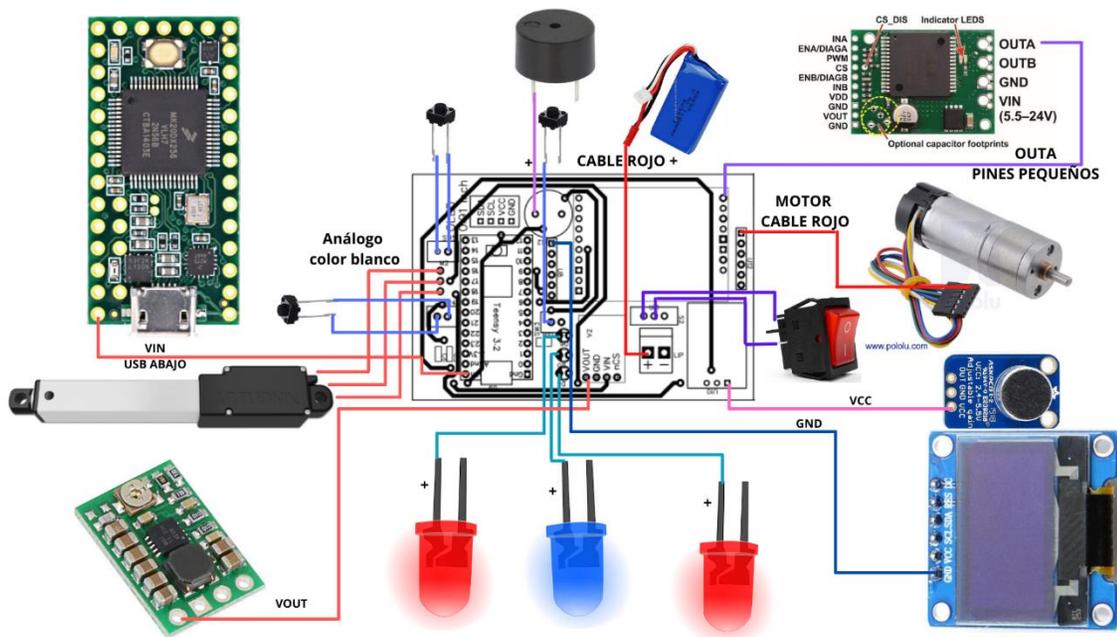
Diagrama de conexiones



Para las conexiones de la placa, se detalla en la **Figura 94**, tener mucho cuidado con la orientación al momento de poner los componentes, ya que podrían quemarse si se ponen de otra manera:

Figura 94

Diagrama de conexión a la placa PCB



Sistema HMI - OLED

Al momento de encender el prototipo, se comprobará el funcionamiento de los leds con un sonido inicial del BUZZER, diciendo que está listo para empezar a trabajar, en la **Figura 95**, se nos presenta el menú principal el cuál despliega las 4 cuerdas que existen en el violín y debemos escoger la que queremos afinar con el botón OPCIÓN se cambia entre cada alternativa y el botón ENTER selecciona dicha selección.

Figura 95*Menú principal – Seleccionar Cuerda*

Luego se procede a dar el botón Enter, el cual abrirá el nuevo menú ¿Está seguro/a?, este menú nos ayudará a cuadrar el dispositivo en la clavija, y con el botón giro-motor que se encuentra en el mango del dispositivo se puede girar la garra para una mejor acomodación del prototipo sobre el violín como se puede observar en la

Figura 96:**Figura 96***Menú ¿Está seguro/a?*

Se recomienda cambiar la opción a SI para estar listos para la siguiente parte, que es darle al botón ENTER que entra al menú CONTROLADOR por unos segundos y empezar a tocar la cuerda constantemente para la respectiva captación de sonido, en la **Figura 97**, se detalla la visualización de este menú:

Figura 97

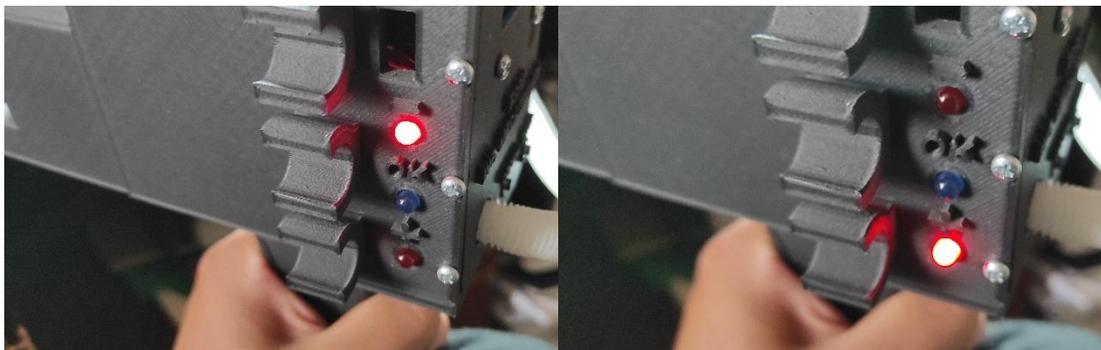
Menú Controlador



Al momento de entrar a este menú los leds rojos parpadearán hasta recibir algún sonido, los mismos que indicaron si está en una frecuencia por abajo o por encima de la frecuencia ideal como se puede verificar en la **Figura 98**:

Figura 98

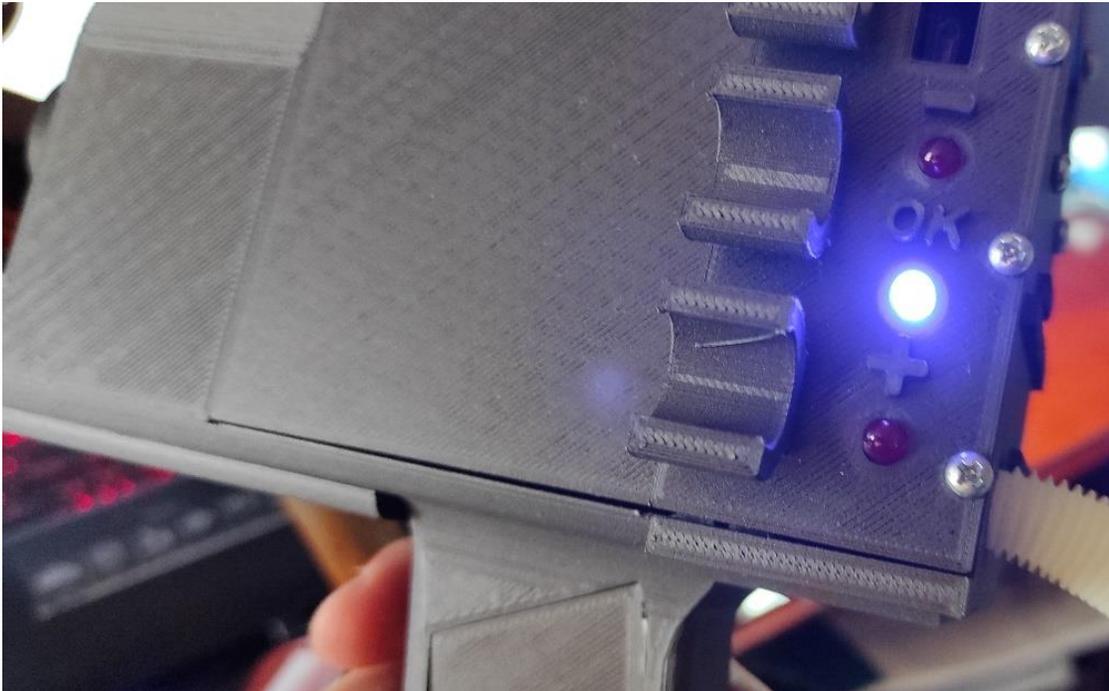
Espera de sonido – Sonido menos o más que la frecuencia ideal



Cuando la frecuencia llegue al valor aproximado, se prenderá el LED de color azul, indicando que está en la frecuencia ideal como se puede observar en la **Figura 99**:

Figura 99

Frecuencia OK



Una vez realizado el controlador que dura aproximadamente 10 segundos, otra vez vuelve al menú ¿Está seguro/a? para confirmar si la frecuencia está bien, se lo realiza unas 4 a 5 veces o hasta que el LED azul se prenda indicando que está en la frecuencia ideal. Si el motor no gira lo más probable es que no esté recibiendo sonido o que la batería esté descargada. Ver Manual de instrucciones para mayor información en Anexos.

Capítulo IV:

Pruebas y resultados.

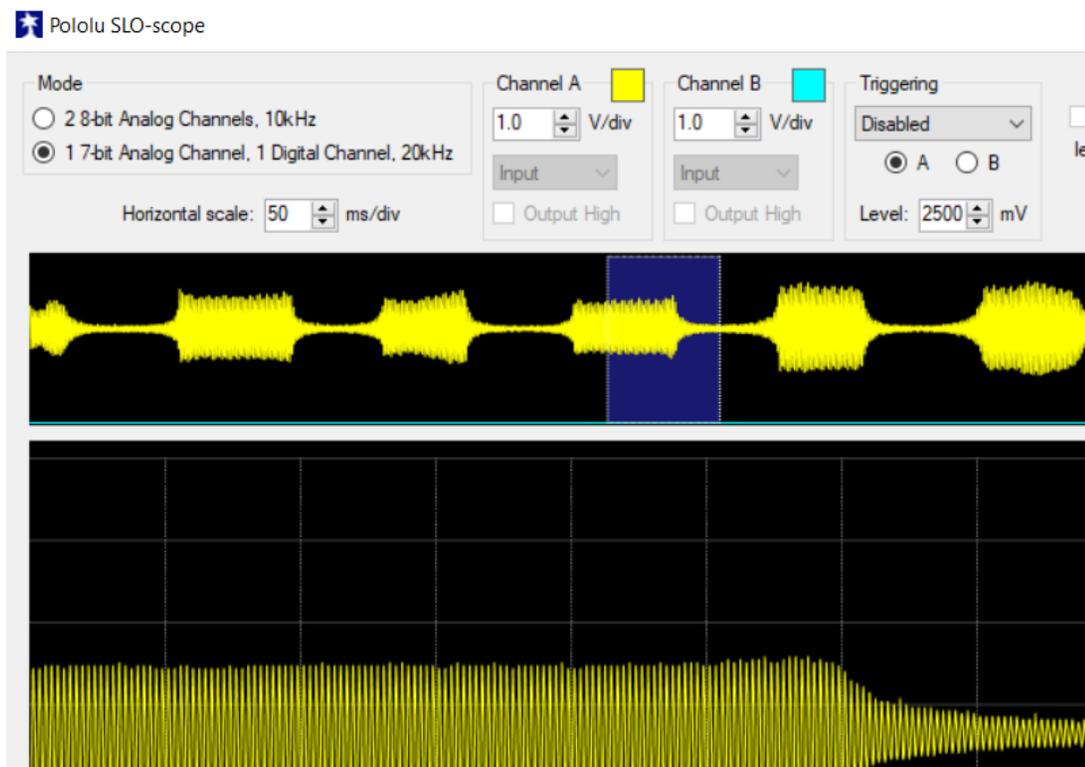
Pruebas de componentes eléctricos

Prueba del módulo del micrófono

Para comprobar el funcionamiento del micrófono, se realizó una prueba con un programa que nos muestra si recibe señal o si esta es completamente nula, tal como se muestra en la **Figura 100**, los resultados fueron favorables ya que, si recibía una buena señal, con buena amplitud y filtración.

Figura 100

Prueba de la señal del micrófono



Prueba del motor lineal

El motor lineal funcionaba como un servo, se necesita saber cuáles son los valores de cada extremo, para eso se fue probando partiendo de 0 hasta 255, dando como resultados los datos recopilados en la **Tabla 21**:

Tabla 21

Valores máximo del motor lineal para su desplazamiento

Parámetro	Valor
Límite inferior	47
Límite superior	138

Prueba y resultados del sistema integrado

Las pruebas del sistema integrado se realizaron en dos partes, una de forma personal y otra con los estudiantes del colegio de artes “Bolívar” donde a lo largo de dos semanas se ubicaron sus domicilios y se procedió a realizar las pruebas del dispositivo obteniendo 6 muestras.

La prueba individual se lo realizó antes y después de las pruebas en los estudiantes del colegio de artes, para descartar si el tamaño del violín influía en el porcentaje de error del dispositivo, y por estadística ANOVA se comprobó que no influye.

Partimos con los estudiantes del colegio de artes los cuáles tienen entre 1 a 2 años de estudio del instrumento, a excepción de una alumna que lleva 1 mes de clases particulares.

Dichos alumnos se les presentó un pequeño cuestionario que recopila información relevante que se resume en la **Tabla 22**:

Tabla 22

Respuestas de los alumnos a las interrogantes

Pregunta	Valeria	María Paz	Luciana	Julian	Sol	Elian
Edad del alumno	8 años	10 años	7 años	10 años	10 años	8 años
Fecha de la prueba	09/07/21	09/07/21	11/07/21	12/07/21	12/07/21	16/07/21
Tamaño del violín	1/8	1/2	1/2	1/2	3/4	1/2
Tiempo de estudio del instrumento	1 año	2 años	1 mes	2 años	2 años	1 año
¿Ha tenido problemas de afinación en clases?	Sí, se desafina en la práctica	Los maestros no le ensañan a afinar	Más o menos, en la práctica más	A veces, intenta afinar por él mismo	Sí, en la práctica en casa.	Siempre se desafina antes de las clases y en los videos
¿Se ha roto alguna cuerda? y	Sí, la de Sol, \$ 7	Se salieron las	No	Sí la de MI, \$ 10	\$ 8.50 las 4 cuerdas	2 veces la de

¿Cuál fue el costo de la cuerda rota?	las 4 cuerdas	cuerdas no se rompieron					SOL, \$10
¿Considera el uso de este tipo de dispositivos en el aprendizaje?	Sí, para saber cómo	Sí, \$100	Sí, \$200	Sí, \$30	Sí \$180	Sí, 30\$	
Y ¿Cuál sería una inversión inicial para este dispositivo?	afinar, \$100						

Con estos resultados podemos hacer un aproximado de que por cada año de estudio se rompe entre 1 a 2 cuerdas por lo que se gasta \$10 anuales, en 4 o 5 años son \$100 dólares que se gasta solamente en cuerdas del violín.

Debido a la pandemia, todos los alumnos nuevos de este instrumento han tenido problemas de afinación en clases y sobre todo en la casa, ya que no pueden practicar como es debido y sus habilidades no mejoran.

Todos están dispuestos a invertir en un dispositivo así cerca de los \$150, para poder afinar o ayudarles a afinar a sus hijos el instrumento y que ellos puedan coger las clases virtuales o el ensayo en casa como es debido.

Se hicieron las pruebas en los 3 tamaños del violín, desde el 1/8, 1/2 y 3/4, faltando únicamente el tamaño normal del violín que por lo general a ese tamaño los niños que empiezan a temprana edad ya pueden afinar, pero para los adultos sería muy interesante realizar las pruebas en ese tamaño pero este estudio no abarca el análisis en estudiantes adultos que están iniciando en este instrumento.

Dada estas conclusiones, se procede a realizar el análisis de las frecuencias y los tiempos de cada estudiantes y madres de familia que colaboraron con la realización de esta fase de pruebas.

La **Tabla 23**, nos presenta los resultados realizados por la madre de Valeria en la primera pasada:

Tabla 23

Respuestas en frecuencia, Madre de Valeria. 1era Pasada

Cuerda - Nota	Frecuencia inicial [Hz]	Frecuencia final [Hz]	Frecuencia real [Hz]	Error Absoluto [Hz]	Error Relativo	Tiempo [mm:ss]
1ra - MI5	556.6	672	659.26	12.74	1.93	00:56
2da - LA4	435.3	452.3	440	12.3	2.80	00:56
3ra - RE4	249.5	298.4	293.66	4.74	1.61	01:30
4ta - SOL3	176.5	185.4	196	10.6	5.41	01:58
PROMEDIO - TOTAL				10.10	2.94	05:20

En la **Tabla 24**, se presentan los resultados en la segunda pasada:

Tabla 24

Respuestas en frecuencia, Madre de Valeria. 2da Pasada

Cuerda - Nota	Frecuencia inicial [Hz]	Frecuencia final [Hz]	Frecuencia real [Hz]	Error Absoluto [Hz]	Error Relativo	Tiempo [mm:ss]
1ra - MI5	659.5	660.9	659.26	1.64	0.25	00:54
2da - LA4	436.8	435.4	440	4.6	1.05	02:18
3ra - RE4	298.3	296.3	293.66	2.64	0.90	01:18

4ta - SOL3	185.4	187	196	9	4.59	01:19
PROMEDIO - TOTAL				4.47	1.70	05:49

Procedemos de igual manera para la madre de María Paz en la primera pasada, se muestra en la **Tabla 25**:

Tabla 25

Respuestas en frecuencia, Madre de María Paz. 1era Pasada

Cuerda - Nota	Frecuencia inicial [Hz]	Frecuencia final [Hz]	Frecuencia real [Hz]	Error Absoluto [Hz]	Error Relativo	Tiempo [mm:ss]
1ra - MI5	584.3	662.7	659.26	3.44	0.52	01:51
2da - LA4	402.4	541.7	440	101.7	23.11	01:52
3ra - RE4	280.6	291.1	293.66	2.56	0.87	01:49
4ta - SOL3	171.2	187.5	196	8.5	4.34	01:26
PROMEDIO - TOTAL				29.05	7.21	06:58

Ahora la segunda pasada de la madre de María Paz en la **Tabla 26**:

Tabla 26

Respuestas en frecuencia, Madre de María Paz. 2da Pasada

Cuerda - Nota	Frecuencia inicial [Hz]	Frecuencia final [Hz]	Frecuencia real [Hz]	Error Absoluto [Hz]	Error Relativo	Tiempo [mm:ss]
1ra - MI5	632.5	645.8	659.26	13.46	2.04	01:17
2da - LA4	528.1	445	440	5	1.14	00:56
3ra - RE4	282	285.8	293.66	7.86	2.68	02:28
4ta - SOL3	179.3	184.2	196	11.8	6.02	01:19
PROMEDIO - TOTAL				9.53	2.97	06:00

Vamos ahora con la prueba de Luciana en la primera pasada, **Tabla 27**:

Tabla 27*Respuestas en frecuencia, Luciana. 1era Pasada*

Cuerda - Nota	Frecuencia inicial [Hz]	Frecuencia final [Hz]	Frecuencia real [Hz]	Error Absoluto [Hz]	Error Relativo	Tiempo [mm:ss]
1ra - MI5	601	610.7	659.26	48.56	7.37	04:10
2da - LA4	421.4	482.3	440	42.3	9.61	02:19
3ra - RE4	256.1	292.6	293.66	1.06	0.36	03:05
4ta - SOL3	181.1	176.2	196	19.8	10.10	02:01
PROMEDIO - TOTAL				27.93	6.86	11:35

Procedemos a realizar la segunda pasada, en la **Tabla 28**:

Tabla 28*Respuestas en frecuencia, Luciana. 2da Pasada*

Cuerda - Nota	Frecuencia inicial [Hz]	Frecuencia final [Hz]	Frecuencia real [Hz]	Error Absoluto [Hz]	Error Relativo	Tiempo [mm:ss]
1ra - MI5	610.7	653.8	659.26	5.46	0.83	03:20
2da - LA4	482.3	438.5	440	1.5	0.34	03:18
3ra - RE4	292.6	293.9	293.66	0.24	0.08	04:20
4ta - SOL3	176.2	187.2	196	8.8	4.49	02:01
PROMEDIO - TOTAL				4	1.44	12:59

A continuación, en la **Tabla 29**, se presentan los datos de la Madre de Luciana en la primera pasada:

Tabla 29*Respuestas en frecuencia, Madre de Luciana. 1era Pasada*

Cuerda - Nota	Frecuencia inicial [Hz]	Frecuencia final [Hz]	Frecuencia real [Hz]	Error Absoluto [Hz]	Error Relativo	Tiempo [mm:ss]
1ra - MI5	576	638.2	659.26	21.06	3.19	02:01
2da - LA4	408	440.5	440	0.5	0.11	00:47
3ra - RE4	250.5	276.8	293.66	16.86	5.74	01:56

4ta - SOL3	167.4	185	196	11	5.61	00:55
PROMEDIO - TOTAL				12.355	3.67	05:39

Se procede a realizar la segunda pasada con la madre de Luciana en la **Tabla**

30:

Tabla 30

Respuestas en frecuencia, Madre de Luciana. 2da Pasada

Cuerda - Nota	Frecuencia inicial [Hz]	Frecuencia final [Hz]	Frecuencia real [Hz]	Error Absoluto [Hz]	Error Relativo	Tiempo [mm:ss]
1ra - MI5	628.8	650.2	659.26	9.06	1.37	02:09
2da - LA4	432	445	440	5	1.14	03:12
3ra - RE4	276.7	290	293.66	3.66	1.25	03:24
4ta - SOL3	185	187.8	196	8.2	4.18	02:15
PROMEDIO - TOTAL				6.48	1.99	11:00

Se procede con los resultados de Julian en la primera pasada en la **Tabla 31:**

Tabla 31

Respuestas en frecuencia, Julian. 1era Pasada

Cuerda - Nota	Frecuencia inicial [Hz]	Frecuencia final [Hz]	Frecuencia real [Hz]	Error Absoluto [Hz]	Error Relativo	Tiempo [mm:ss]
1ra - MI5	569	648.5	659.26	10.76	1.63	03:27
2da - LA4	399.8	424.3	440	15.7	3.57	02:37
3ra - RE4	264.8	300.4	293.66	6.74	2.30	02:36
4ta - SOL3	174.1	183	196	13	6.63	01:36
PROMEDIO - TOTAL				11.55	3.53	10:16

En la **Tabla 32**, se presentan los resultados en la 2da pasada:

Tabla 32*Respuestas en frecuencia, Julian. 2da Pasada*

Cuerda - Nota	Frecuencia inicial [Hz]	Frecuencia final [Hz]	Frecuencia real [Hz]	Error Absoluto [Hz]	Error Relativo	Tiempo [mm:ss]
1ra - MI5	642.8	657.6	659.26	1.66	0.25	01:52
2da - LA4	413.9	432	440	8	1.82	03:12
3ra - RE4	298.2	296.1	293.66	2.44	0.83	01:04
4ta - SOL3	178.2	192	196	4	2.04	03:25
PROMEDIO - TOTAL				4.02	1.24	09:33

Ahora vamos con la prueba con Sol, en la primera pasada, se ven los resultados en la **Tabla 33**:

Tabla 33*Respuestas en frecuencia, Sol. 1era Pasada*

Cuerda - Nota	Frecuencia inicial [Hz]	Frecuencia final [Hz]	Frecuencia real [Hz]	Error Absoluto [Hz]	Error Relativo	Tiempo [mm:ss]
1ra - MI5	659.26	659.26	659.26	0	0.00	00:00
2da - LA4	375	436.1	440	3.9	0.89	00:40
3ra - RE4	293.66	293.66	293.66	0	0.00	00:00
4ta - SOL3	168.6	195.5	196	0.5	0.26	01:38
PROMEDIO - TOTAL				2.2	0.57	02:18

En la segunda pasada, tenemos los siguientes resultados, en la **Tabla 34**:

Tabla 34*Respuestas en frecuencia, Sol. 2da Pasada*

Cuerda - Nota	Frecuencia inicial [Hz]	Frecuencia final [Hz]	Frecuencia real [Hz]	Error Absoluto [Hz]	Error Relativo	Tiempo [mm:ss]
1ra - MI5	659.26	659.26	659.26	0	0.00	00:00
2da - LA4	438.2	441	440	1	0.23	00:27
3ra - RE4	293.66	293.66	293.66	0	0.00	00:00

4ta - SOL3	185.9	188	196	8	4.08	02:26
PROMEDIO - TOTAL				4.5	2.15	02:53

Para terminar esta fase, se procedió a realizar con la madre de Elian, en la primera pasada obtuvimos los resultados de la **Tabla 35**:

Tabla 35

Respuestas en frecuencia, Madre de Elian. 1era Pasada

Cuerda - Nota	Frecuencia inicial [Hz]	Frecuencia final [Hz]	Frecuencia real [Hz]	Error Absoluto [Hz]	Error Relativo	Tiempo [mm:ss]
1ra - MI5	572.8	641	659.26	18.26	2.77	02:20
2da - LA4	415.3	438.5	440	1.5	0.34	01:36
3ra - RE4	273.5	278.5	293.66	15.16	5.16	03:20
4ta - SOL3	176.8	195.8	196	0.2	0.10	02:26
PROMEDIO - TOTAL				8.78	2.09	09:42

Y para la segunda pasada de la Madre de Elian en la **Tabla 36**:

Tabla 36

Respuestas en frecuencia, Madre de Elian. 2da Pasada

Cuerda - Nota	Frecuencia inicial [Hz]	Frecuencia final [Hz]	Frecuencia real [Hz]	Error Absoluto [Hz]	Error Relativo	Tiempo [mm:ss]
1ra - MI5	632.8	657.7	659.26	1.56	0.24	02:04
2da - LA4	440.1	440.1	440	0.1	0.02	00:32
3ra - RE4	275.9	293.1	293.66	0.56	0.19	01:44
4ta - SOL3	203	198.2	196	2.2	1.12	01:40
PROMEDIO - TOTAL				1.10	0.39	06:00

Realizando un análisis de covarianza obtenemos el error de la desviación estándar como se muestra en la **Tabla 37**:

Tabla 37

Resumen de respuestas y Error de desviación Estándar

Sujeto	Error Absoluto [Hz]	X-u	$(X - u)^2$	Desviación estándar	Error de desviación estándar
1	4.47	-0.40	0.16	2.40	0.91
2	9.53	4.66	21.70		
3	4	-0.87	0.76		
4	6.48	1.61	2.59		
5	4.02	-0.85	0.72		
6	4.5	-0.37	0.14		
7	1.10	-3.77	14.22		
TOTAL	4.87		40.30		

Es decir, un promedio de error de las 4 cuerdas es de 4.87 ± 2.40 con un error de 0.91 de esa variación. El error se concentra sobre todo en la cuerda de Sol, por ser una cuerda de frecuencias bajas, el micrófono tiende a captar frecuencias por encima o por debajo de la ideal. Este error rodea los 12 hertzios de diferencia.

Para determinar si el tamaño del violín influye en el porcentaje de error de cada cuerda se procedió a realizar el ANOVA que se presenta en la **Tabla 38**, a continuación:

Tabla 38

ANOVA, estudio de si el tamaño del violín influye en el porcentaje de error

Cuerda - Nota	Tamaño 1/8	Tamaño 1/2	Tamaño 3/4	Tamaño 4/4	
1ra - MI5	3.34	2.74	4.14	3.44	4
2da - LA4	0.7	0.7	0.8	4.8	4
3ra - RE4	1.24	1.06	1.46	3.74	4
4ta - SOL3	13.9	16.2	12.5	6.5	745.23
	19.18	20.7	18.9	18.48	77.26
	4	4	4	4	16
	4.80	5.18	4.73	4.62	4.83

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F0	P value
Tratamientos	0.70	3	0.23	0.01	1.00
Error	371.46	12	30.95		
TOTAL	372.16	15		F(0,05;3,12)	3.49

Se analiza la hipótesis nula en la **Tabla 39**:

Tabla 39

Hipótesis nula

hipotesis nula : $u_1=u_2.....$
0.01 > 3,49 FALSE
1.00 < 0,05 FALSE
Hipotesis nula= "El tamaño del violín no afecta el error de afinación"
Como no cumple se acepta la hipótesis Nula

Por lo tanto, el tamaño del violín no afecta el error de afinación. Por último, se realiza una comparación dado que son el mismo número de muestras para cada tamaño del violín obteniendo los resultados en la **Tabla 40**, con los valores de t igual a 2.18 y LSD de 8.57:

Tabla 40

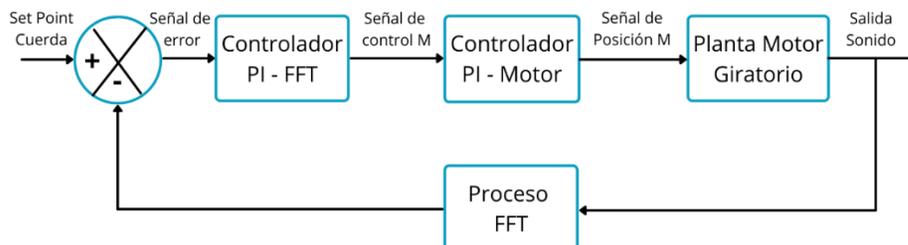
Comparación de medias

U20-U40	4.80	8.57	NO significativo
U20-U60	5.18	8.57	NO significativo
U20-U80	4.73	8.57	NO significativo
U20-U100	4.62	8.57	NO significativo
U40-U60	0.38	8.57	NO significativo
U40-U80	0.07	8.57	NO significativo
U40-U100	0.18	8.57	NO significativo
U60-U80	0.45	8.57	NO significativo
U60-U100	0.56	8.57	NO significativo
U80-U100	0.11	8.57	NO significativo

A continuación, se demostró la estabilidad del controlador del prototipo, que no haya sobre picos y un tiempo de estabilización aceptable, pero antes de eso se realiza un diagrama esquemático del funcionamiento de la planta en la **Figura 101**:

Figura 101

Esquema de la planta con los controladores



Nota. Son dos controladores en serie, debido a que uno recibe la señal de sonido y la otra, controla la posición del motor como un servomotor.

Los valores asignados a cada controlador se detallan en la **Tabla 41**:

Tabla 41

Valores del controlador PI

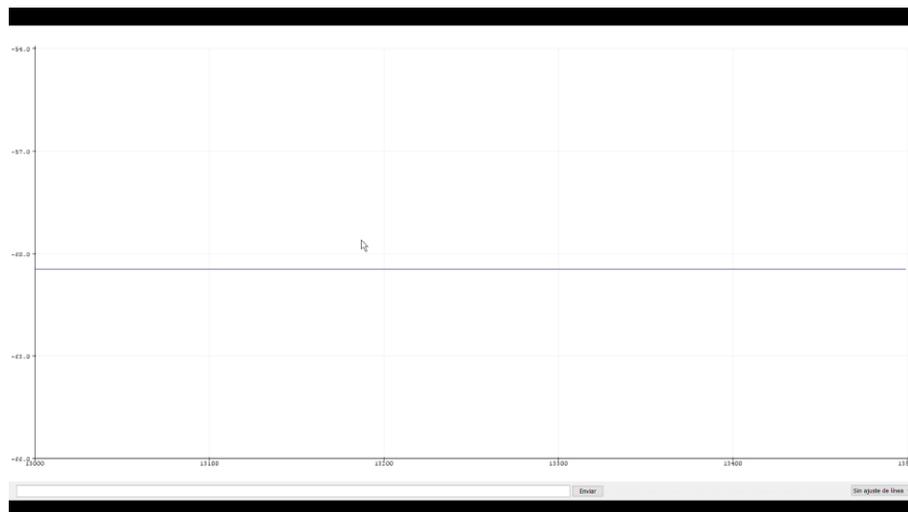
Fórmula: $PI = k_p \cdot \text{error} + k_i \cdot \text{integralerror}$	
Controlador PI - FFT	
Kp	2
Ki	0.1
Controlador PI - Motor	
Kp	10
Ki	0.1

Nota. Para el cálculo del integralerror se estableció un límite de cálculo cuando se está lo más cerca del set-point y así evitar una sobresaturación de memoria por la gran cantidad de datos que se calcularía. ± 26 para PI - FFT y ± 20 para PI - Motor.

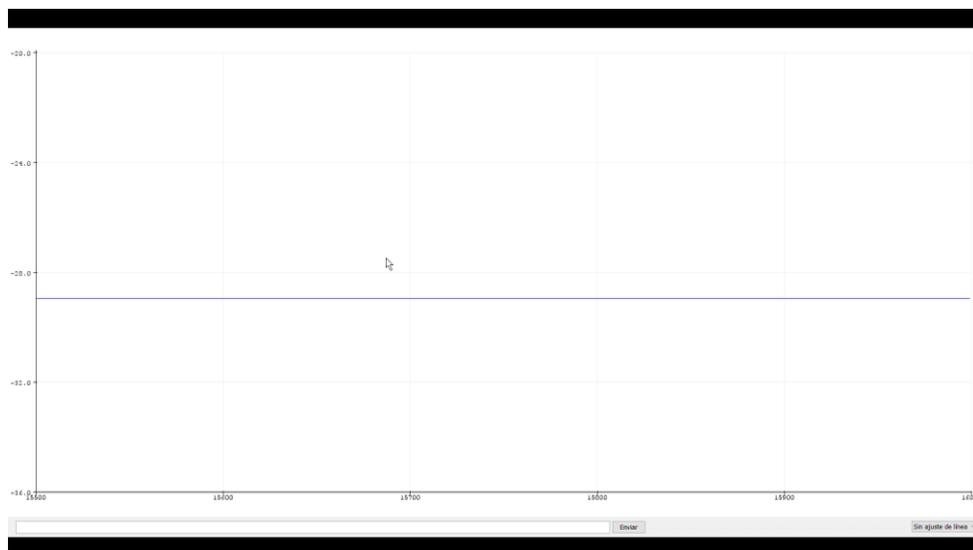
En la **Figura 102**, se presentó el resultado de la afinación sin controlador:

Figura 102

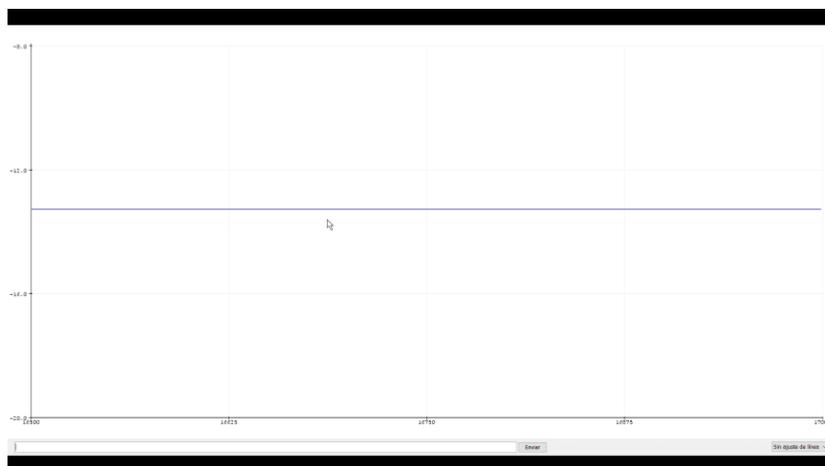
Resultado de la afinación sin controlador



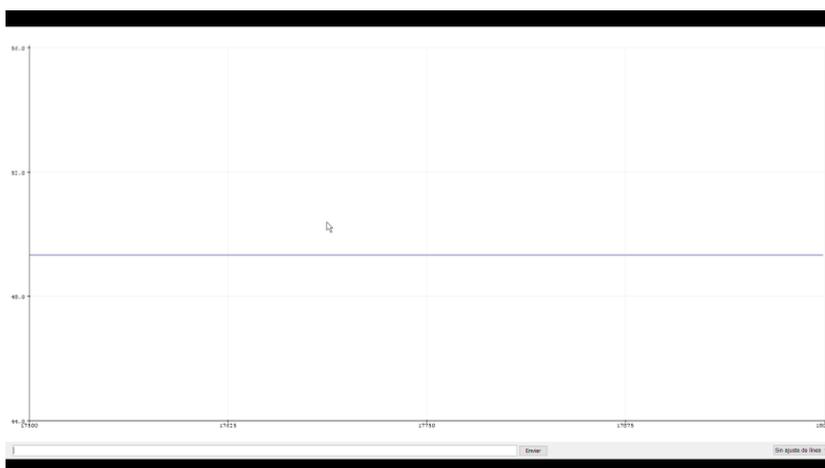
Nota. El error comienza en -61 hertzios a los 13 segundos.



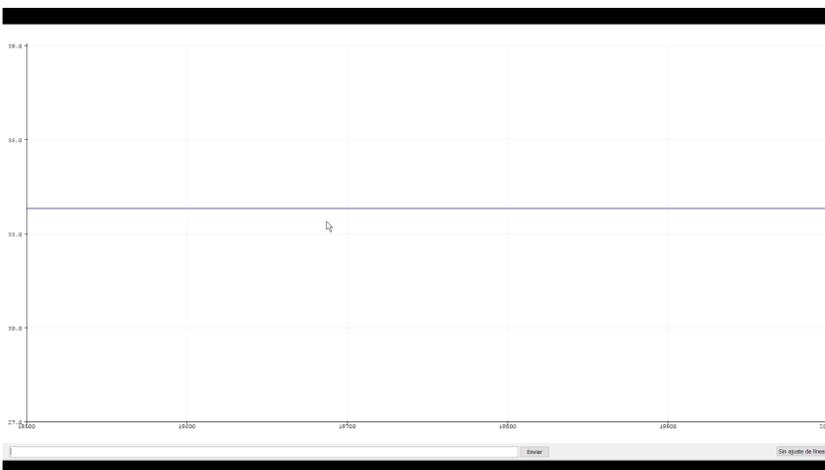
Nota. Luego disminuye el error a -29 a los 15.5 segundos.



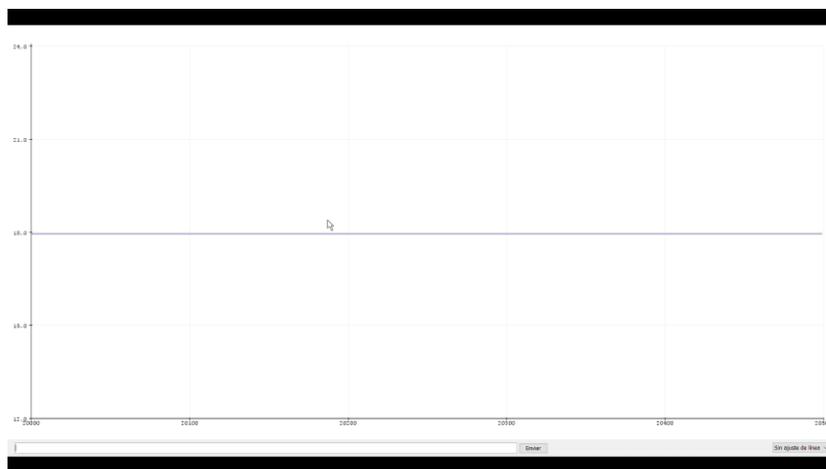
Nota. A posterior disminuye el error a -13 a los 16.5 segundos.



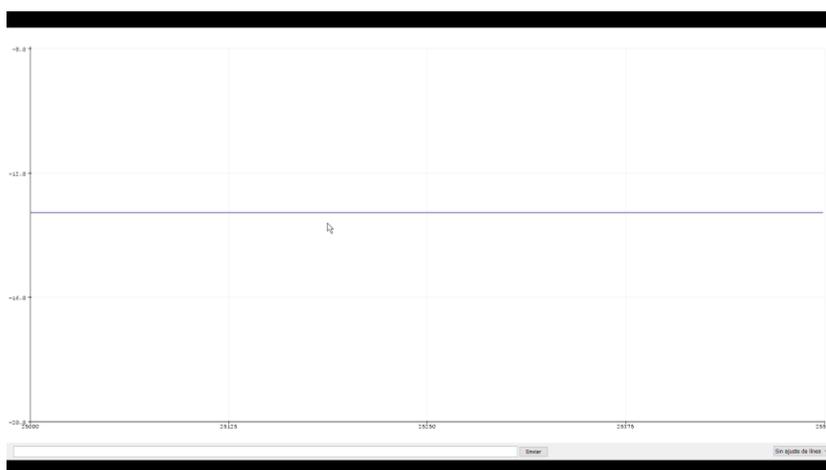
Nota. Ocurre el sobre pico a +49 hertzios a los 17.5 segundos.



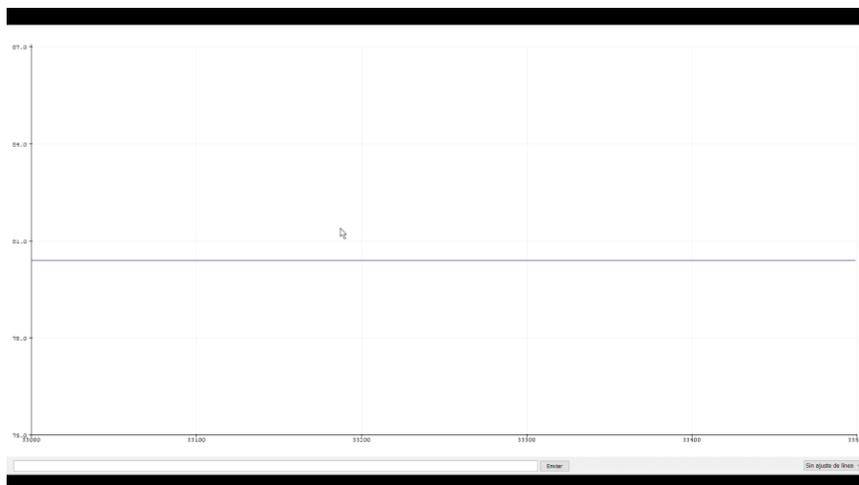
Nota. Disminuye poco a poco a +34 hertzios a los 19.5 segundos.



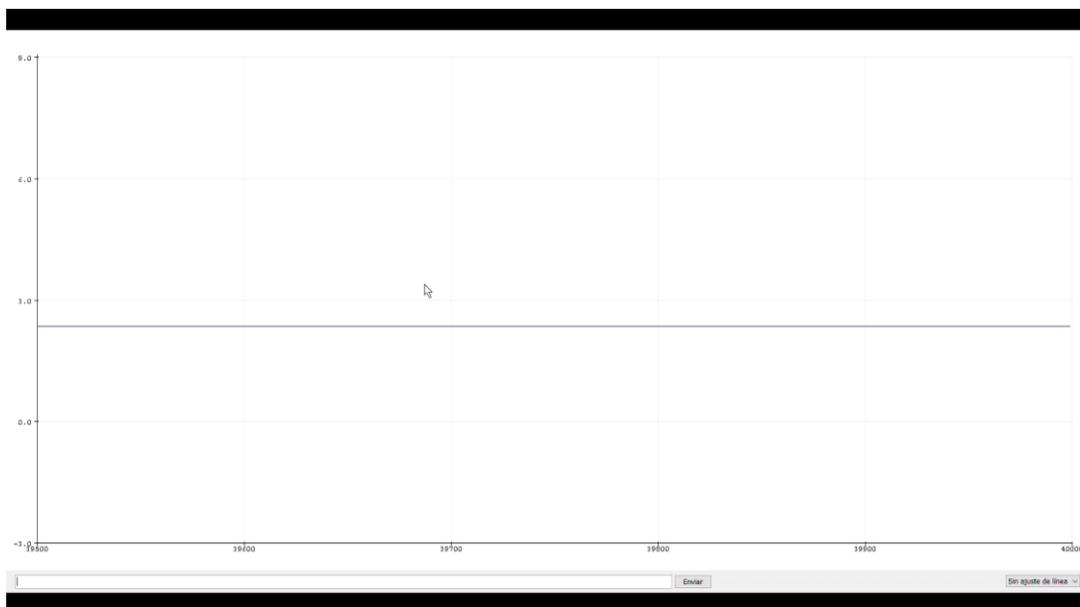
Nota. Disminuye a +18 hertzios a los 20 segundos.



Nota. Va bajando y disminuye nuevamente a -13 hertzios a los 25 segundos.



Nota. Ocurre otro sobre pico a +80 hertzios a los 33 segundos.

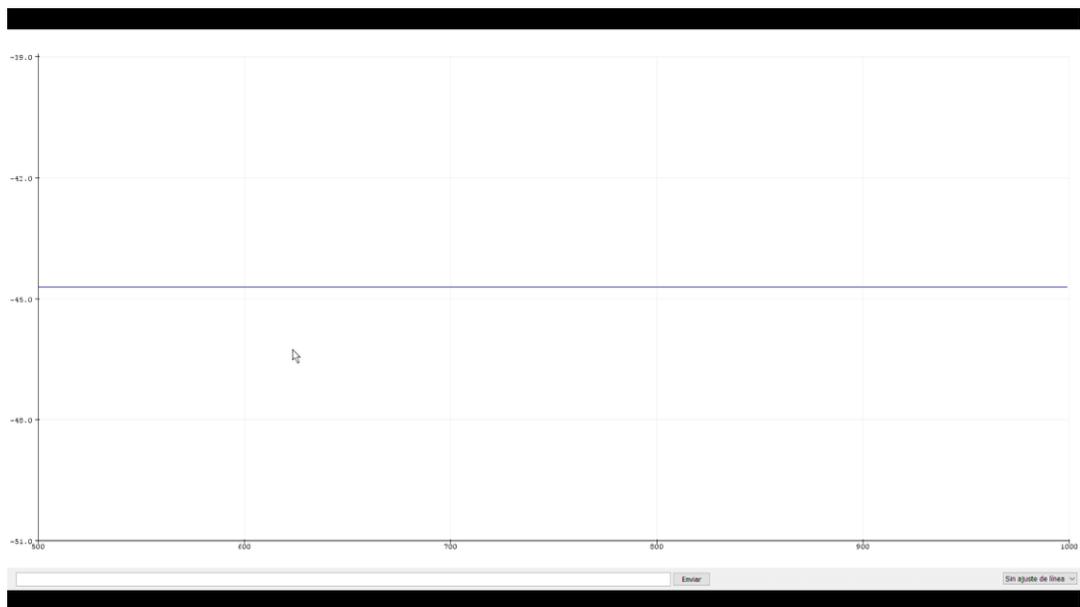


Nota. Logra estabilizarse a +2 hertzios a los 39.5 segundos. (26.5 segundos en total)

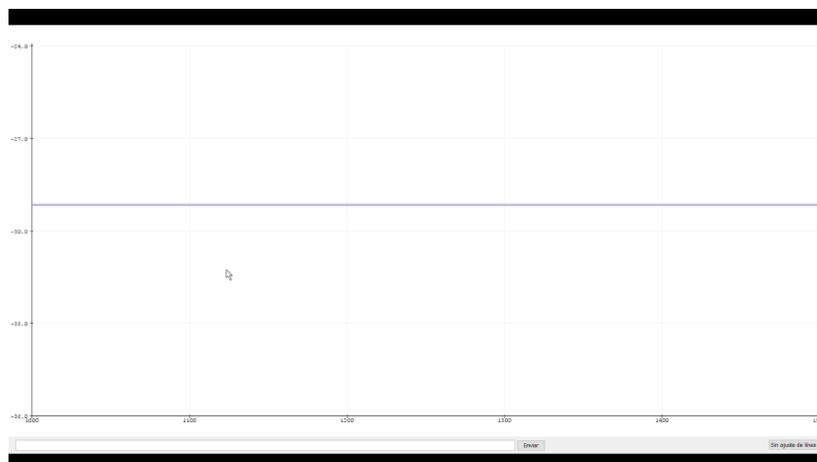
Y en la **Figura 103**, se presentó los resultados de la afinación con controlador:

Figura 103

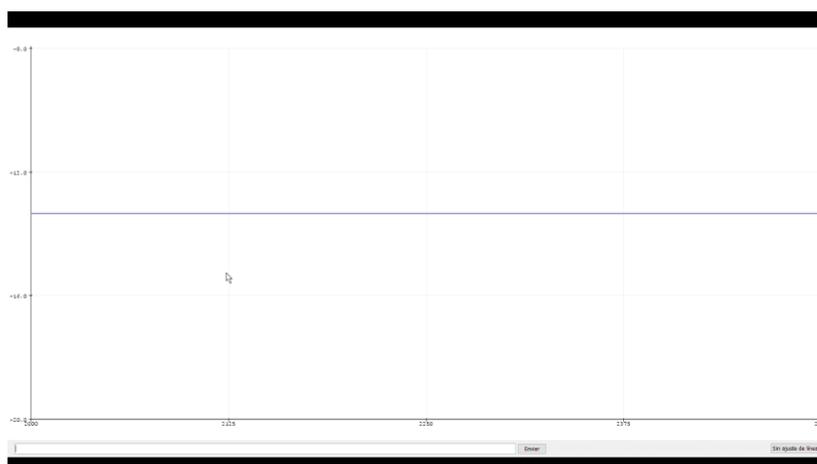
Resultado de la afinación con controlador



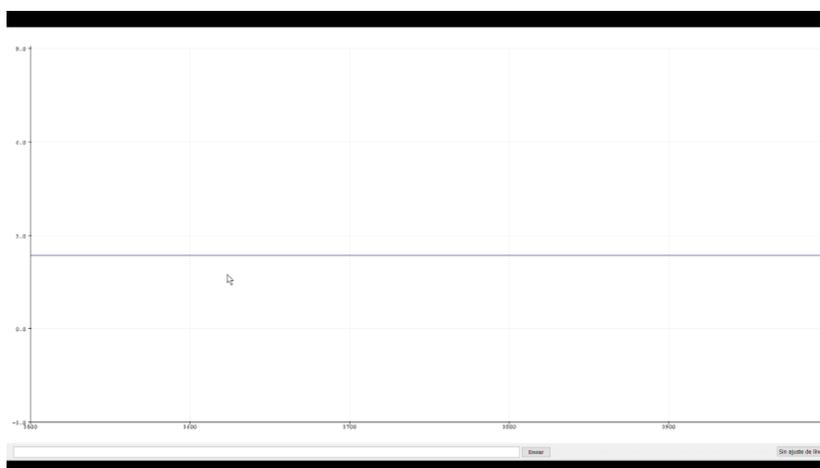
Nota. Empieza el error en -45 hertzios a los 0.5 segundos.



Nota. Disminuye a -49 hertzios al 1 segundo.



Nota. Sigue disminuyendo a -11 hertzios a los 2 segundos.



Nota. Logra estabilizarse a +2 hertzios a los 3.5 segundos. (3 segundos en total)

Obviamente existe una tremenda mejora en el tiempo de estabilización de 23.5 a 3 segundos y de existir 2 sobre picos a no existir ningún sobre pico. El controlador funciona.

Análisis de costos y estudio de mercado

En la **Tabla 42**, se detalló todos los gastos que tuvo el desarrollo del presente proyecto, desde que inicio hasta que terminó, con todos los componentes que se utilizaron como desarrollo hasta el prototipo final funcional.

Tabla 42

Costo de materiales y prestación de servicios desde que se inició hasta que se concluyó

Unidad	Material	Costo	Proveedor
3 Kg	Material de PLA Impresión	94.7	Xtrega 3D
Varios	Motores Iniciales, Programador, Baby y componentes	125.01	Av Electronics
2	Motores lineales	226	Artil Robotics
2	Motores Giratorios	49.3	Electrostore Quito
1	Placa PCB 1	14.51	Novatronic
1	Nuevos Motores giratorios con eje extendido	87.25	Av Electronics
2	Rodamientos	10	Bower Ambato
1	Fresas CNC y Resistencias	12	Novatronic
1	Placa de aluminio 6 mm	8	Artil Robotics
1	Conector bateria	2	Artil Robotics
Varios	Motores nuevos con max torque	100	Av Electronics
Varios	Abono tornillos y nuevos materiales	60	Av Electronics
	Placa PCB 2	10	Nastratech
	Corte y tornillo M3 Garras de aluminio	16	Servicor
1	Teensy 3.2	40	Artil Robotics
2	USB Charger	15.25	Proveedor de Cuenca Byron Contreras
1	Nueva pantalla mas grande	10	Novatronic
3	Juegos de Cuerdas	18	Guitar Center
1	Tornillos y componentes electrónicos varios	20	Ferreteria y Novatronic
1	Material ABS	20	Xtrega 3D

1	Repuestos impresora 3D	85	Xtrega 3D
1	Costo de Transporte para las pruebas	10	Gasolinera El colombiano
1	Placa Final PCB 3	10	Novatronic
2	Mangueras de pianica	10	Masmusik
1	Impresora 3D Ender 3 Pro	475	Xtrega 3D
TOTAL		1528.02	

Nota. Costos incluye IVA

Ahora tomando en cuenta gastos indirectos, que se refiere a gastos como luz que ocupó la impresora 3D, internet, agua y transporte se detalla en la **Tabla 43**:

Tabla 43

Costos Indirectos y directos del prototipo funcional

No.	Descripción	USD/semana	Semanas	Valor Total (USD)
1	Servicios Básicos	10	20	200
2	Internet	6.25	20	125
3	Transporte	5	20	100
4	Luz	5	20	100
Total		26.25	20	525

Por último, costos por mano de obra implementando el prototipo se detalla en la

Tabla 44:

Tabla 44

Costos Mano de Obra y Programación

No.	Nombre	USD/semana	Semanas	Valor Total (USD)
1	Diego Reyes	100	20	2000
Total		10	20	2000

El costo final del proyecto se detalla en la **Tabla 45**:

Tabla 45*Costo Total del proyecto*

No.	Descripción	Valor Total (USD)
1	Materiales y prestación de servicios	1528.02
2	Gastos Indirectos y directos	525
3	Gasto mano de obra y Programación	2000
	Subtotal	4053.02
	Imprevistos (10%)	405.30
	Total	4458.32

Como estudio de mercado, se calculó un precio de solamente la materia prima, necesaria para producir una serie de 10 afinadores con la **Tabla 46**, queda en un valor aproximado de 400 USD, que puede ser menos, dependiendo el precio de las importaciones que varía cada mes en el país.

Tabla 46*Costo de materia prima para una serie de 10 afinadores*

Componentes	VALOR (USD)
Motor con base	65
Microcontrolador	40
Manguera	10
Material de Impresión	15
Driver motor	40
Pantalla OLED	15
Botones	1
Leds	1
Buzzer	1
Resistencias y regulador	3
Cables	3
Bateria LIPO 2S 550mAH	30
Switch	1
Tornillos	1
Fabricación PCB	10
Suelda	3
Componentes electrónicos varios	5

Envíos Servientrega	40
Costos de Importaciones (Variable)	116
TOTAL	400

Dado que en el mercado actual no existen afinadores automáticos para violín no se puede realizar una investigación de mercados a fondo, ya que la oferta es nula, pero la demanda es bastante alta, lo que podría ser un emprendimiento sostenible en el tiempo y favorable para la economía del país, ya que se apunta a la venta del mismo de forma nacional e internacional.

Por último, se realizó un pesaje del prototipo, para determinar su portabilidad al momento de su transporte, alcanzó normalmente en una maleta normal debido a sus medidas máximas de 220x195x65 milímetros y su peso exacto de 0.556 kilogramos.

Figura 104

Pesaje del dispositivo – 0.556 kilogramos



Nota. El pesaje se realizó con una balanza profesional que nos proporciona 3 decimales de aproximación con un error mínimo de ± 0.001 kilogramos.

Capítulo V:

Conclusiones y recomendaciones.

Conclusiones

- Se diseñó e implementó un prototipo funcional que funciona en todos los tamaños de violín, mejorando notablemente la afinación de todas las cuerdas del violín con un promedio de error absoluto de 4.87 ± 2.40 en todas las cuerdas, con un error máximo de 11.8 hertzios en la cuerda de SOL y un mínimo de 0.1 Hertzios en la cuerda de LA sin alterar la arquitectura del instrumento, es decir, un dispositivo completamente independiente y universal. Ahorrando costos de cuerdas y tiempo de afinación en un promedio de 8 minutos entre todas las cuerdas para el ensayo en casa de cada estudiante.
- Todas las cuerdas del violín de los estudiantes al momento de realizar las pruebas estuvieron por muy debajo de la frecuencia ideal por -40 a -150 hertzios en las diferentes cuerdas del violín.
- Se implementó una transformada rápida de Fourier de manera de programación que sea capaz de detectar casi al instante los hertzios del sonido detectado (100 ms) por cada sonido detectado.
- Se implementó el diseño de dos controladores capaces de responder rápidamente y sin sobre picos, como se muestra en la parte de resultados, el tiempo de estabilización fue reducido de 23.5 segundos a 3 segundos y de existir 2 sobre picos a no existir ningún sobre pico.
- Se diseñó un prototipo que sea de fácil comprensión con solamente 3 botones y una pantalla OLED, que niños de 7 años hasta 10 años lo manejaban con bastante soltura y tranquilidad. Cuyo manejo lo pudieron hacer con un poco de ayuda al momento de aplastar los botones que estaban alejados por su tamaño

de mano, si pudieron con su peso y al momento de su funcionamiento, soportar la fuerza del motor.

- Se diseñó un prototipo con las medidas mínimas requeridas para cada componente, con un peso de 0.556 kilogramos, que puede ser cargado dentro de una maleta sin mucha complicación y portabilidad. Reduciendo al máximo los precios llegando a un valor de 284 dólares sin tomar en cuenta los costos de importación.
- Se optimizó al máximo la FFT, creando funciones directas como el seno y el coseno, para evitar el uso de memoria y aumentar el tiempo de respuesta del código. La FFT es la primera puerta de entrada hacia el funcionamiento general.
- Se comprobó que la afinación de todas las cuerdas tiene un error aproximado de 4.87 ± 2.40 Hertzios y dentro del oído humano casi es imperceptible. Alumnos que no sabían afinar el violín para nada, lo lograron en menos de 8 minutos hacerlo sin mucho esfuerzo, debido a que las clavijas tienen un torque bastante alto a comparación de la fuerza de un niño de 7 años de edad.

Recomendaciones

- Se recomienda rediseñar la ubicación de los botones hacia el mango del prototipo, para un mejor manejo en manos pequeñas y en las manos normales, ya que los botones de OPCIÓN y ENTER se encuentran un poco alejado del mango que debe sostener firmemente al momento de afinar.
- Se recomienda realizar un estuche anticaídas y antigolpes para el prototipo y que sea mucho más fácil su transportación y portabilidad.
- Se recomienda investigar otros métodos de FFT que respondan mejor a las frecuencias por debajo de los 200 Hertzios y por encima de los 650 Hertzios y reducir aún más el error absoluto de cada cuerda.

- Se recomienda realizar mantenimiento cada año al prototipo, debido a que la soldadura de la placa PCB, suele romperse o dañarse con el paso del tiempo.
- Se recomienda siempre cargar al dispositivo antes de usarlo, para tener mejores resultados y que el motor responda en su máxima capacidad de carga.

Bibliografía

- Aguirre Sankar, I. J. *Estudio del arco del violín como una de las principales herramientas que apoyan al instrumentista en el desarrollo de su interpretación. Revisión histórica de su desarrollo morfológico y elementos técnicos relevantes.*
- Alcarria, D. C. (2017). Hans Memling, *estudio de los antecedentes del arco del violín: la excelencia de unos arcos olvidados*. Berceo, (172), 161-184.
- Andrade Zumárraga, E. G., & Jurado López, A. F. (2013). *Diseño y construcción de un sistema automático de afinación de guitarras eléctricas de la serie PRV de VOGEL GUITARS* (Bachelor's thesis, QUITO/EPN/2013).
- Balcázar Bustamante, C. A. (2020). *Diseño e implementación de pedales de guitarra eléctrica de afinación, distorsión y delay* (Bachelor's thesis, Quito, 2020.).
- Brito, D., & Castellanos, J. (2019). *Análisis del consumo de combustible del motor chevrolet aveo 1.4 cc, utilizando múltiples de admisión termoplásticos* (Bachelor's thesis, QUITO/UIDE/2019).
- CARRILLO AGUILLON, D. A. V. I. D. (2016). *Preparación de un composito a partir de pla y fibra de carbono.*
- Catuta, C. A. (2014). *Diseño e implementación de un afinador electrónico para el estudio de diferenciación del sonido en una guitarra primer electroacústica* (Bachelor's thesis, Quito: Universidad Israel, 2014).
- D. Rapos, C. Mechefske y M. Timusk, "Calibración de sensor dinámico: un estudio comparativo de un sensor de efecto Hall y un codificador incremental para medir la posición de rotación del eje", Conferencia Internacional IEEE 2016 sobre

Pronóstico y Gestión de la Salud (ICPHM) , Ottawa , ON, Canadá, 2016, págs. 1
5, doi: 10.1109 / ICPHM.2016.7542858.

De Diego Beade, A. M., & de la Fuente, J. M. M. (1989). *Fundamentos físicos de la
música*. Universidad de Valladolid, Instituto de Ciencias de la Educación.

de la Fuente, J. M. M. (2001). *Concepto moderno de la consonancia musical*. Revista de
acústica, 32(1), 18-22.

DEL CALOR, E. D. O. Y. (2000). *UNA PERSPECTIVA HISTÓRICA DE LAS SERIES
DE FOURIER: DE LAS ECUACIONES DE ONDAS Y DEL CALOR A LOS
OPERADORES COMPACTOS Y AUTOADJUNTOS* Revista Latinoamericana de
Investigacion en Matematica Educativa, noviembre, año/vol. 3, número 003.
Revista Latinoamericana de Investigación en Matemática Educativa, 3(3), 293
320.

Esteve-Faubel, J. M., Espinosa Zaragoza, J. A., Molina Valero, M. Á., & Botella-Quirant,
M. T. (2009). *El sonido y sus cualidades*. Lenguaje Musical.

Fétis, F. J. (1864). Notice of Anthony Stradivari, the Celebrated Violin-maker, Known by
the Name of Stradivarius: Preceded by Historical and Critical Researches on the
Origin and Transformations of Bow Instruments, and Followed by a Theoretical
Analysis of the Bow, and Remarks on Francis Tourte, the Author of Its. Reeves.

GALARZA PANIMBOZA, J. D., CARVAJAL, I. E., & FERNANDO, L. DEPARTAMENTO
DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA.

Gámez, B., Flores, C., Cabrera, F., & Cabrera, J. (2016). *Design of a biomechanics
prosthesis for child*. Ingeniería UC, 23(1), 58-66.

- García López, Á. (2016). *Diseño e implementación de un afinador cromático para guitarra* (Master's thesis).
- Gonçalves Molina, Y. D. C. (2020). *Empleo de técnicas de análisis tiempo-frecuencia para el modelado de instrumentos musicales y su aplicación a la síntesis musical aditiva* (Doctoral dissertation).
- HERNÁNDEZ GAVIÑO, RICARDO. (2010). *Introducción a los sistemas de control: Conceptos, aplicaciones y simulación con MATLAB*. (1a. Ed.). PEARSON EDUCACIÓN.
- López, M. R. (2000). *Ingeniería acústica*. Paraninfo.
- Meneses Yaruro, Y. E. (2014). *Diseño y fabricación de un módulo didáctico basado en DsPIC como herramienta de apoyo en el aprendizaje de sistemas de control digital con énfasis en la implementación de filtros digitales*.
- Odremán, J. G. (2014). *Impresión 3D en la Industria: Un acercamiento a la tecnología y su influencia en la Industria Petrolera*. Universidad, ciencia y tecnología, 18(73), 166-180.
- Ogata, Katsuhiko. (1998). *Ingeniería de control moderna*. (3a Ed.). Prentice-Hall
- Ojeda, M. *Tecnología de los Plásticos*. Retrieved Septiembre 17, 2014, from Blog dedicado a los materiales plásticos, características, usos, fabricación, procesos de transformación y reciclado:
<http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2013/02/impresion-3d.html>. (2013).
- Paredes, J. (2017, junio 18). *Afinador de guitarra automático*. [Blog]. Afinador de guitarra automático. <https://site.ieee.org/sb-utnfrsn/2018/04/24/afinador-guitarra/>

- Rao, Singiresu S. (2012). *Vibraciones Mecánicas*. (5ta ed.). PEARSON EDUCACIÓN.
- Ribes Blanco, J. (2012). *Implementación de efectos de audio para trombón de vara en el dispositivo reprogramable "Chameleon"* (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València).
- Rodríguez Ballesteros, I. F. (2013). *Descripción física de la armonía clásica*.
- Ruda Gazcón-Araoz, D. (2019). *Diseño y desarrollo de un afinador automático de guitarra*.
- Salazar Riquelme, C. A. (2015). *Diseño de un afinador electromecánico para instrumentos de cuerda con sistema sinfín-corona*.
- Sánchez Navasa, J. (2015). *Diseño y montaje de un prototipo funcional de un afinador automático de guitarra* (Master's thesis).
- Sánchez Rodríguez, S. (2017). *Diseño e implementación de un afinador polifónico de guitarra* (Bachelor's thesis).
- Serna, L., & Albán, F. (2003). *Ácido poliláctico (PLA): Propiedades y aplicaciones*. *Ingeniería y competitividad*, 5(1), 16-26.
- Silvela, Z. (2003). *Historia del violín*. Entrelineas Editores.
- Suzuki, S., & Preucil, W. (2007). *Suzuki violin school: violin part (Vol. 1)*. Alfred Music Publishing.
- Urresta Pérez, C. F. (2020). *Caracterización de las propiedades mecánicas de materiales impresos mediante la técnica de impresión 3D fused deposition modeling (FDM)* (Bachelor's thesis).

Valdez Moncayo, C. B. (2014). *La melodía de las matemáticas* (Bachelor's thesis, Quito, 2014).

