



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE ELECTRONICA Y TELECOMUNICACIONES**

**EVALUACIÓN DEL USO DE UN INSTRUMENTO THEREMÍN
ELECTRÓNICO EN LA CREACIÓN DE MÚSICA POPULAR Y MÚSICA
CLÁSICA Y SU EFECTO EN LA CALIDAD DE SONIDO.**

Trabajo de Titulación para optar al título de:
INGENIERO EN ELECTRONICA Y TELECOMUNICACIONES

Autor:

Cabezas Granizo Ariel Enrique

Tutor:

PhD. Leonardo Fabian Rentería Bustamante

Riobamba, Ecuador. 2024

DECLARATORIA DE AUTORÍA

Yo, **ARIEL ENRIQUE CABEZAS GRANIZO**, con cédula de ciudadanía **172154716-2**, autor del trabajo de investigación titulado: **EVALUACIÓN DEL USO DE UN INSTRUMENTO THEREMÍN ELECTRÓNICO EN LA CREACIÓN DE MÚSICA POPULAR Y MÚSICA CLÁSICA Y SU EFECTO EN LA CALIDAD DE SONIDO**, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de mí exclusiva responsabilidad.

Asimismo, cedo a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto de los derechos de autora de la obra referida será de mi entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, 26 de abril de 2024.



Ariel Enrique Cabezas Granizo
C.I.:172154716-2

DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR



Dirección
Académica
VICERRECTORADO ACADÉMICO



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
UNACH-RGF-01-04-02.19
VERSIÓN 02: 06-09-2021

ACTA FAVORABLE - INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CARRERAS NO VIGENTES

En la Ciudad de Riobamba, a los 26 días del mes de abril de 2024, luego de haber revisado el Informe Final del Trabajo de Investigación presentado por el estudiante **Ariel Enrique Cabezas Granizo** con CC: **172154716-2**, de la carrera **Electrónica y Telecomunicaciones** y dando cumplimiento a los criterios metodológicos exigidos, se emite el **ACTA FAVORABLE DEL INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN** titulado **"EVALUACIÓN DEL USO DE UN INSTRUMENTO THEREMÍN ELECTRÓNICO EN LA CREACIÓN DE MÚSICA POPULAR Y MÚSICA CLÁSICA Y SU EFECTO EN LA CALIDAD DE SONIDO "**, por lo tanto se autoriza la presentación del mismo para los trámites pertinentes.



Firmado digitalmente por
**LEONARDO FABIAN
RENTERIA BUSTAMANTE**

PhD. Leonardo Fabian Rentería
TUTOR

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación “EVALUACIÓN DEL USO DE UN INSTRUMENTO THEREMÍN ELECTRÓNICO EN LA CREACIÓN DE MÚSICA POPULAR Y MÚSICA CLÁSICA Y SU EFECTO EN LA CALIDAD DE SONIDO”, presentado por ARIEL ENRIQUE CABEZAS GRANIZO, con cédula de identidad número 1721547162, bajo la tutoría de PhD. Leonardo Fabian Rentería Bustamante; certificamos que recomendamos la APROBACIÓN de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba 09 de mayo de 2024.

PhD. Marlon Basantes
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO





Dr. Klever Torres
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO

Msc. José Jinez
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



CERTIFICADO ANTIPLAGIO



Dirección
Académica
VICERRECTORADO ACADÉMICO

en movimiento



UNACH-RGF-01-04-08.17
VERSIÓN 01: 06-09-2021

CERTIFICACIÓN

Que, **CABEZAS GRANIZO ARIEL ENRIQUE** con CC: **172154716-2**, estudiante de la Carrera de **ELECTRONICA Y TELECOMUNICACIONES**, Facultad de INGENIERIA; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado " **EVALUACIÓN DEL USO DE UN INSTRUMENTO THEREMÍN ELECTRÓNICO EN LA CREACIÓN DE MÚSICA POPULAR Y MÚSICA CLÁSICA Y SU EFECTO EN LA CALIDAD DE SONIDO** ", cumple con el **5%**, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **TURNITIN**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 26 de abril de 2024



LEONARDO FABIAN
RENTERIA BUSTAMANTE

PhD. Leonardo Fabian Renteria
TUTOR

DEDICATORIA

Dedico este proyecto de titulación a Dios como muestra de mi total gratitud y amor hacia él. A mis queridos padres, Luz Granizo y Enrique Cabezas, quienes desde el primer día me enseñaron el valor del esfuerzo y la perseverancia. Vuestra dedicación y sacrificio son la razón por la cual hoy puedo estar aquí, culminando este importante capítulo de mi vida. Cada logro alcanzado es también vuestro, pues vuestro amor y apoyo incondicional han sido mi mayor fortaleza en este camino.

A mis hermanas, por ser mi fuente constante de inspiración y alegría. Vuestra presencia ha llenado de color y significado cada momento de mi vida, y hoy comparto con ustedes este logro con profunda gratitud y cariño.

A mi familia y amigos, quienes vuestra compañía, complicidad y apoyo han sido un regalo invaluable en este viaje. Cada risa compartida y cada abrazo en los momentos difíciles han sido el bálsamo que ha hecho más ligero este camino hacia el éxito.

Ariel Enrique Cabezas Granizo

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Nacional de Chimborazo y a la carrera de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones por haberme acogido y brindar una educación de calidad.

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a mi tutor de tesis, PhD. Leonardo Rentería, por su experta supervisión, sus valiosos consejos y su incansable dedicación. Sus conocimientos y perspectivas fueron fundamentales para el desarrollo de este proyecto de titulación.

Finalmente, también agradezco la generosidad de los profesores, expertos y participantes en el estudio, cuya contribución fue fundamental para el éxito de esta investigación. Este logro no habría sido posible sin su apoyo y confianza.

Ariel Enrique Cabezas Granizo

DECLARATORIA DE AUDITORIA
DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR
CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL
CERTIFICADO ANTIPLAGIO
DEDICATORIA
AGRADECIMIENTO
ÍNDICE GENERAL
ÍNDICE DE TABLAS
ÍNDICE DE FIGURAS
RESUMEN
ABSTRACT

ÍNDICE GENERAL

1. CAPÍTULO I. INTRODUCCION	16
1.1 ANTECEDENTES.....	16
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	19
1.4 OBJETIVOS	19
1.4.1 Objetivo General.....	19
1.4.2 Objetivos Específicos.....	19
2. CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....	20
2.1 ESTADO DEL ARTE	20
2.2 MARCO CONCEPTUAL.....	21
2.3 EL SONIDO Y LAS VIBRACIONES ELÉCTRICAS	22
2.3.1 Oscilaciones Armónicas	22
2.3.2 Vibraciones.....	23
2.3.3 Circuitos Oscilantes.....	23
2.4 CAPACITANCIA DEL SISTEMA ANTENA-MANO	24
2.4.1 Distancia de la Mano	25
2.5 PRINCIPIO HETERODINO	26

2.5.1	Control de Volumen	27
2.5.2	Salida de Audio	27
3.	CAPÍTULO III. METODOLOGIA	28
3.1	TIPO DE INVESTIGACIÓN	28
3.2	DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	28
3.3	MÉTODO DE INVESTIGACIÓN	30
3.3.1	Investigación Descriptiva	30
3.3.2	Investigación Experimental	30
3.4	TECNICA DE RECOLECCION DE DATOS	30
3.4.1	Fuentes de Información.....	30
3.4.2	Instrumento de Recolección de Datos	31
3.5	POBLACION DE ESTUDIO Y TAMAÑO DE LA MUESTRA	31
3.5.1	Población	31
3.5.2	Muestra.....	32
3.6	OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLE	32
3.6.1	Variable Dependiente	32
3.6.2	Variable Independiente	33
3.7	MÉTODOS DE ANÁLISIS, Y PROCESAMIENTO	33
3.7.1	FASE I: BÚSQUEDA Y ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO DE THEREMÍN	33
3.7.2	FASE II: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO	39
3.7.3	FASE III: FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO	57
4.	CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	61
4.1	LINEA MELODICA 1 – MUSICA CLASICA	61
	PRUEBA DE NORMALIDAD	61
	HIPOTESIS	61
	PRUEBA NO PARAMETRICA	62

DIAGRAMA DE CAJAS	62
4.2 LINEA MELODICA 2 – MUSICA POPULAR	63
PRUEBA DE NORMALIDAD	63
HIPOTESIS	64
PRUEBA NO PARAMETRICA	64
DIAGRAMA DE CAJAS	65
5. CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	66
5.1 CONCLUSIONES	66
5.2 RECOMENDACIONES	67
BIBLIOGRAFÍA	68
ANEXOS	70
Implementación	70
Análisis de frecuencia	71
.....	72
.....	72
.....	72
Calidad de sonido	73
.....	73
.....	73
Líneas melódicas	74
.....	75
.....	75
Grabación de audio en estudio musical	75
.....	75
.....	76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Variables Dependientes.	32
Tabla 2: Variables Independiente.....	33
Tabla 3: Datos detector de proximidad.	46
Tabla 4: Datos característicos antena monopolo vertical.	47
Tabla 5: Datos característicos antena bucle.	48
Tabla 6: Datos de Diodo Rectificador.....	49
Tabla 7: Datos Filtro Activo paso bajo.	50
Tabla 8: Datos filtro activo pasa banda.	51
Tabla 9: Características amplificador base común.	53
Tabla 10: Características de los elementos electrónicos del prototipo.	54
Tabla 11: Características del diseño de la carcasa del prototipo.	56
Tabla 12: Prueba de Normalidad- frecuencia y tipo de instrumento.	61
Tabla 13 : Prueba U de Mann-Whitney (Frecuencia-tipo instrumento).	62
Tabla 14: Prueba de Normalidad Frecuencia y tipo de instrumento.	64
Tabla 15 : Prueba U de Mann-Whitney (Frecuencia y tipo de instrumento).	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Instrumento Theremín.....	21
Figura 2 : Oscilaciones Simples y Compuestas.....	23
Figura 3: Capacitancia CA introducida por el conjunto antena-mano en paralelo con C0. 25	
Figura 4: Construcción de la señal heterodino $p(t)$ por el producto de $S1 \times S2$ y filtrado para obtener la señal $S(t)$ que tiene la frecuencia de audio	26
Figura 5: Conexión de salida de audio mono del theremín a un amplificador.....	27
Figura 6: Diseño de la investigación.	29
Figura 7: Primer Theremín analógico.....	34
Figura 8: Theremín de Moog.....	35
Figura 9: Diseño de circuito theremín.	37
Figura 10: Theremín Digital.	38
Figura 11: Diseño del Sistema theremín.....	40
Figura 12: Fuente de Alimentación - Adaptador.....	41
Figura 13: Circuito Integrado MC14069UBCP.....	42
Figura 14: Circuito Integrado MM74C14N.....	43
Figura 15: Diseño de un Oscilador con Inversor.	44
Figura 16: Oscilador con Schmitt- trigger.....	45
Figura 17: Diagrama de funcionamiento de la capacitancia.....	45
Figura 18: Movimiento y posicionamiento de la mano.....	46
Figura 19: Antena Monopolo Vertical.....	47
Figura 20: Antena Monopolo forma de Bucle.....	48
Figura 21: Sistema Mixer de señal.	49
Figura 22: Diseño filtro pasa bajo.	50
Figura 23: Filtro pasa banda.	51
Figura 24: Transistor 2N4401.....	52
Figura 25: Diseño del Amplificador Base común.	52
Figura 26: Diseño del diagrama Electrónico del theremín.	53
Figura 27: Placas del circuito electrónico del theremín.	55
Figura 28: Diseño de carcasa del prototipo en SketchUp.....	56

Figura 29: Prototipo final del theremín.	57
Figura 30: Análisis de frecuencias generadas por el prototipo.....	58
Figura 31: Afinador del programa REAPER, Afinador Cromático clásico.	59
Figura 32: Conexión de altavoces al prototipo y sonido.	59
Figura 33 Creación de línea melódica.	60
Figura 34 Espectro de línea melódica.....	60
Figura 35 : Diagrama de cajas de las distribuciones de frecuencias respecto al Tipo de Instrumento.....	63
Figura 37: Diagrama de cajas de las distribuciones de frecuencias respecto al Tipo de Instrumento.....	65
Figura 36 : Diagrama de cajas de las distribuciones de frecuencias respecto al Tipo de Instrumento.....	65

RESUMEN

En este trabajo de investigación se evalúa el uso de un instrumento de theremín electrónico en la generación de música en contextos contemporáneos. Este proyecto se desarrolló en tres fases, comenzando con una revisión histórica del theremín; se analizó su diseño y funcionamiento, destacando características únicas y desafíos técnicos. A través de un enfoque práctico, se exploraron los aspectos claves de la construcción y calibración de un theremín, abordando consideraciones específicas como la selección de componentes y el diseño de circuitos. Se examinaron también las diferentes opciones disponibles para el diseño físico del instrumento, así como las técnicas de ensamblaje y ajuste para optimizar su funcionamiento. Se diseñó e implementó un prototipo de instrumento de theremín basado en circuitos integrados de osciladores e inversores. Además, con ayuda de un intérprete experto se investigó el proceso de aprendizaje y el dominio del theremín, incluyendo ejercicios de práctica y recomendaciones para mejorar la precisión y expresividad en la interpretación. Para evaluar el funcionamiento del prototipo se generaron dos tipos de líneas melódicas, una clásica y una popular o experimental con el prototipo y con dos instrumentos más, un piano y sintetizador; estas pruebas fueron realizadas dentro de un estudio de producción musical. Finalmente se aplicó una prueba de hipótesis no paramétrica obteniendo como resultado que las distribuciones de frecuencia del prototipo son iguales a las distribuciones de los 2 instrumentos es decir el theremín implementado funciona correctamente para los dos tipos de música.

Palabras clave: theremín, osciladores, circuitos integrados, frecuencias, líneas melódicas.

ABSTRACT

In this research work, the use of an electronic theremin instrument in generating music within contemporary contexts is evaluated. This project unfolded in three phases, commencing with a historical review of the theremin. Its design and operation were analyzed, emphasizing unique features and technical challenges. Through a practical approach, key aspects of constructing and calibrating a theremin were explored, addressing specific considerations such as component selection and circuit design. Various options for the physical design of the instrument were also examined, along with assembly techniques and adjustments to optimize its performance. A theremin instrument prototype was designed and implemented based on integrated oscillator and inverter circuits. Furthermore, with the assistance of an expert interpreter, the learning process and mastery of the theremin were investigated, encompassing practice exercises and recommendations for enhancing precision and expressiveness in performance. To evaluate the prototype's functionality, two types of melodic lines were generated: a classical one and a popular/experimental one, using the prototype and two additional instruments—a piano and a synthesizer. These tests were conducted within a music production studio. Finally, a non-parametric hypothesis test was applied, yielding a result indicating that the frequency distributions of the prototype are equivalent to those of the two instruments. In other words, the implemented theremin functions correctly for both types of music.

Keywords: theremin, oscillators, integrated circuits, frequencies, melodic lines.



Reviewed by:

Mgs. Hugo Solis V.

ENGLISH PROFESSOR

1. CAPÍTULO I. INTRODUCCION

1.1 ANTECEDENTES

En la actualidad, la música y la electrónica son 2 conceptos inseparables, tanto así que a nivel profesional no se puede considerar a la primera sin el apoyo de la segunda [1].

La acústica es la rama de la física, que estudia al sonido en todos sus aspectos, esta se ocupa de la producción, propagación, además del registro y la reproducción del sonido, así como de los instrumentos y aparatos para su medición [2].

El médico y físico alemán Hermann von Helmholtz mediante su obra “Las sensaciones de tono como base fisiológica para la teoría musical” demostró que el sonido musical podía ser analizado mediante algunos principios físicos básicos. Mostró que el timbre y la calidad de un tono dependía de la intensidad, el orden y además del número de armónicos presentes en una nota [1].

El instrumento theremín es considerado una reliquia para las bandas sonoras de terror y ciencia ficción, este instrumento fue quien preparó el camino hacia los sintetizadores musicales. Este instrumento utiliza dos circuitos primarios: uno que altera el tono y otro que altera el volumen. Estos parámetros son controlados mediante dos antenas, una de ellas de bucle y otra recta, cada circuito produce una serie de ondas electromagnéticas para así producir el tono, el circuito utiliza un par de osciladores de radiofrecuencia sintonizados [3].

Este instrumento tiene la particularidad de ser controlado sin la necesidad del contacto físico del intérprete[7], además contiene dos antenas metálicas que detectan la posición relativa de las manos del interprete [4], que se conectan a los circuitos oscilantes de radiofrecuencia, una antena en forma vertical permite controlar el tono o frecuencia mientras que la otra antena en posición horizontal y en forma de bucle sirve para el control del nivel del volumen,

al momento de interpretar o generar sonidos el intérprete interrumpe las oscilaciones del instrumento para

poder proporcionar notas y así producir melodías [5], El instrumento theremín mide la diferencia entre las oscilaciones y la traduce a una señal de audio, estas señales se amplifican y se envían a un altavoz [3] .

En ese sentido, en este trabajo se implementa un instrumento theremín electrónico para música Popular y Clásica, para evaluar su efecto en la calidad de tipo de música.

Este instrumento electrónico opta por brindar una mejor experiencia musical y audición sonora para los artistas, el instrumento incorporara una salida de audio en estéreo, además que su diseño es más compacto y ligero para que sea más versátil al momento de un ensamble musical y poderlo transportar sin ningún problema.

La estructura del presente trabajo de titulación está comprendida por 5 capítulos que contiene descripción detallada del desarrollo e implementación del proyecto de investigación. A continuación, una explicación breve de los capítulos pertenecientes al trabajo de investigación.

Primer capítulo: se presenta el problema a resolver y se expone la solución correspondiente, además se establecen los objetivos que se desarrollaran en el proyecto.

Segundo capítulo: se realiza la revisión literaria de publicaciones y estudios como revistas, artículos científicos, paper y libros, que contribuyan con la información correspondiente para el proyecto de investigación.

Tercer capítulo: se realiza la descripción detallada de la metodología implementada en el desarrollo de las oscilaciones del instrumento, esto mediante recopilación de información, desarrollo, implementación y el análisis de datos o resultados.

Cuarto capítulo: se presenta el análisis de los datos obtenidos a través de las diferentes pruebas realizadas con el sistema, esto con la finalidad de verificar el funcionamiento adecuado del instrumento theremín.

Quinto capítulo: se presenta las conclusiones y recomendaciones del trabajo de investigación.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El surgimiento de la música digital y electrónica cada vez va más parejo con la tecnología, diversos instrumentos hoy en día son más digitalizados con mejoras en sus procesos profesionales. Esto ha generado un gran interés para los intérpretes de la música y dar un gran avance a los sintetizadores siendo así indispensables para un show artístico, cada vez más surge la necesidad de obtener instrumentos más eficaces y de buena calidad y a la vez evolucionar de un sistema analógico a sistemas digitales que brinden mejorías en el aspecto auditivo y calidad sonora [6]. La música a conseguido grandes avances técnicos específicos gracias a la tecnología que permite al artista hacer o dejar de hacer una determinada obra. Son numerosos los casos en que los inventores de tecnología se inspiran en el arte para crear nuevos artefactos que faciliten o mejoren la vida cotidiana entre los cuales se puede mencionar la fotografía, danza, video mapping y tecnologías como 3D entre otras [8].

Como ejemplo la Universidad Nacional de Chimborazo hoy en día cuenta con una carrera nueva en Artes, la cual tiene diversas disciplinas como es el teatro y la música, estas 2 disciplinas son de un campo muy amplio que generan una gran demanda de instrumentos para poder interpretar una obra, al ser nueva esta carrera aún existe una ausencia de material musical por los instrumentos requeridos y los costos que estos pueden llegar a tener para ser adquiridos.

La carrera de artes va de la mano con los avances tecnológicos en la electrónica, para que así estas disciplinas puedan ejecutarse de la mejor manera posible y puedan ser cada vez más eficientes y de calidad para un verdadero acercamiento al arte práctico como: la audición musical, el ritmo y la ejecución instrumental.

A partir del análisis se propone implementar un instrumento theremín electrónico no muy costoso pero que tenga buena fiabilidad sonora y que sea de fácil accesibilidad con el objetivo de evaluar el uso y la calidad del sonido en espacios controlados y que así puedan obtener mejores experiencias sonoras los artistas o estudiantes de las carreras de artes obteniendo así un acercamiento practico musical real y así se pueda implementar en conciertos y shows en vivo.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Con este presente proyecto de investigación se pretende crear un dispositivo electrónico theremín de fácil accesibilidad, mejorado y más compacto con el objetivo de brindar una mejor experiencia en cuanto a obras de teatro y presentaciones musicales. Generando así un acercamiento real al arte práctico como: la audición musical, el ritmo y la ejecución instrumental. Adicionalmente, se abre un área de estudio multidisciplinaria para nuevas o futuras investigaciones en el ámbito de las tecnologías relacionadas con el arte.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo General

Evaluar el uso de un instrumento theremín electrónico en la creación de música popular y música clásica y su efecto en la calidad del sonido.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Estudiar el instrumento de theremín, mediante análisis e investigación de bibliografía especializada para entender su funcionamiento.
- Diseñar e Implementar un instrumento theremín electrónico que funcione dentro del rango de frecuencias de 168hz a 170khz.
- Evaluar el uso del instrumento de theremín electrónico en la creación de música clásica, popular y el efecto de este en la calidad de sonido a través del análisis de frecuencias.

2. CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1 ESTADO DEL ARTE

El surgimiento de la música digital y electrónica cada vez va más parejo con la tecnología, diversos instrumentos hoy en día son más digitalizados con mejoras en sus procesos profesionales. Esto ha generado un gran interés para los intérpretes de la música y dar un gran avance a los sintetizadores siendo así indispensables para un show artístico, cada vez más surge la necesidad de obtener instrumentos más eficaces y de buena calidad y a la vez evolucionar de un sistema analógico a sistemas digitales que brinden mejorías en el aspecto auditivo y calidad sonora [5].

El theremín, un instrumento único que puede controlarse sin contacto físico, ha fascinado a músicos, ingenieros y oyentes desde su invención en la década de 1920. A lo largo de los años ha sufrido diversos cambios y usos, que han despertado mucho interés en la comunidad académica y musical.

El primer instrumento Theremín fue realizado en la década 1920 por el físico León theremín quien mientras se encontraba trabajando en el laboratorio de radio de Petrogrado en Rusia, este instrumento está basado en la heterodinación de ondas de radio y utiliza la interacción de las manos de quien lo interprete para producir sonidos sin el contacto físico esto gracias a los campos electromagnéticos generados [22].

El instrumento theremín a pesar de que era único e innovador no llegó a convertirse en un instrumento muy popular, pero llamó la atención entre los músicos experimentales y la música electrónica gracias a su sonido ambiente. El instrumento influyó significativamente para el desarrollo de la música electrónica y experimental gracias a esto su popularidad creció, especialmente en la década de 1950 siendo utilizado por músicos virtuosos como Clara Rockmore y destacando así el instrumento [23].

El instrumento a sido utilizado en géneros musicales y experimentales como es la música clásica hasta la música contemporánea [24].

A pesar de los años el instrumento theremin ha venido teniendo numerosas modificaciones a lo que fue el diseño original, así como avances tecnológicos que han ayudado a ampliar sus capacidades de uso [25]. Además, theremin ha sido utilizado como herramienta educativa para la enseñanza de los conceptos de física, electrónica y música de una forma accesible e interactiva [26].

El theremín sigue evolucionando con el desarrollo de nuevas tecnologías además de su integración en contextos musicales y artísticos de hoy en día. Theremín sigue siendo objeto

de investigación y de experimentación tanto en lo académico como en el arte, lo que demuestra una relevancia continua en el panorama musical [27].

Este instrumento se ha utilizado en diversos contextos musicales desde lo clásico, electrónica experimental y música de cine. La capacidad de producir sonidos estéreos y expresivos lo hacen misterioso y único en el mundo de la música. Fuera de su aplicación en la interpretación musical el theremín ha sido objeto de estudio en los campos de interacción humano-computadora y la tecnología de sensores, los científicos e investigadores han explorado formas de mejorar la precisión y sensibilidad además de integrarlo en sistemas avanzados de control gestual [28].

Dentro de sus principios fundamentales de este instrumento son: la capacitancia y la heterodinación de frecuencias que gracias a estos parámetros electrónicos el instrumento es factible.

La alteración de la capacitancia de los circuitos oscilantes hacia la antena del theremín mediante las manos del intérprete afecta a las frecuencias lo que modifica el tono y el volumen del instrumento en cuanto a la capacitancia, la heterodinación de frecuencias es una señal heterodino que contiene la diferencia entre dos señales que se encuentran dentro del rango audible del humano [24].

2.2 MARCO CONCEPTUAL

Instrumento theremín

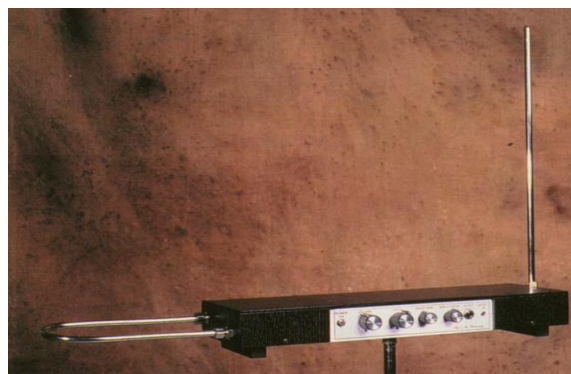


Figura 1: Instrumento Theremín

Este instrumento musical tiene la particularidad de asombrar a la gente por su manera de ser ejecutado, ya que al no tocar físicamente el instrumento sino con solo acercar y alejar

las manos de un par de antenas que tiene el aparato generan sonidos variando el tono (nota musical) y volumen del sonido. A este instrumento se lo llama hoy “Theremín Clásico” y su funcionamiento es electromagnético. Su funcionamiento se explica completamente con la física y corre paralelamente con la invención de la radio, ya que está basada en las mismas leyes [5].

2.3 EL SONIDO Y LAS VIBRACIONES ELÉCTRICAS

El sonido está compuesto de vibraciones (oscilaciones) de la materia, cuando se producen con determinadas características. Las oscilaciones son ligeros movimientos de ida y vuelta de las partículas que forman la materia esta puede ser aire, cuerda, madera, metal, membrana, tímpano [1].

2.3.1 Oscilaciones Armónicas

Estas oscilaciones llamadas armónicas, puras o simples son las más importantes porque en ellas las partículas se desplazan a la misma distancia y demora el mismo tiempo cuando va hacia un lado o hacia otro. Estas vibraciones pueden ser algo irregulares y se las denomina oscilaciones compuestas [7].

Para ilustrar la diferencia entre las oscilaciones simples y complejas, se representa gráficamente el desplazamiento de una partícula arbitraria con respecto al tiempo, como se muestra en la Figura 2. En las vibraciones simples, el número de idas y vueltas (oscilaciones) que la partícula desarrolla en un segundo se llama frecuencia de la oscilación y la unidad de medición es el Hertz (Hz) [8].

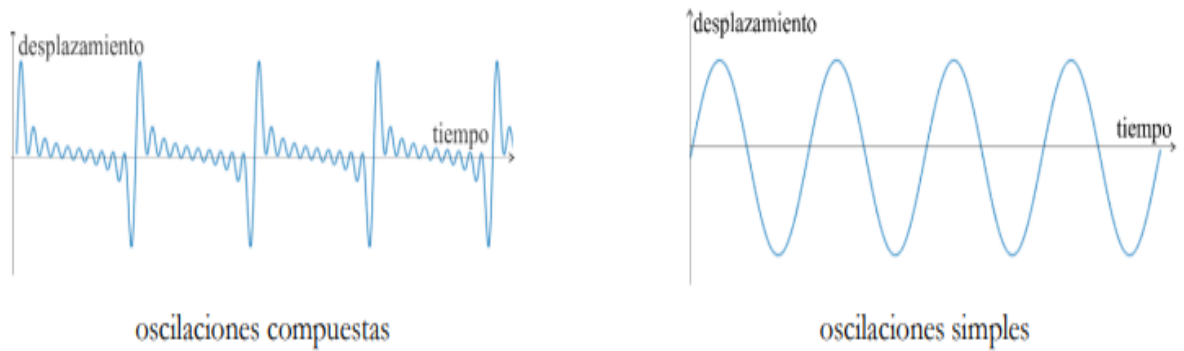


Figura 2 : Oscilaciones Simples y Compuestas.

2.3.2 Vibraciones

Las vibraciones son propagaciones de ondas de energía que viajan a través del aire o de otros materiales. Las frecuencias que van de 20 Hz a 2 KHz, son vibraciones a las que el oído humano es sensible, este intervalo se le denomina sonido.

Todo instrumento musical que no es eléctrico es conocido como “desenchufado”, Este genera y trasmite el sonido hasta el oído por procedimientos mecánicos.

El sonido emitido por un parlante llega a él mediante una corriente eléctrica. Las vibraciones mecánicas del parlante son una copia exacta de las vibraciones de la corriente eléctrica. Así que las gráficas de la figura 2 podrían referirse a valores de corriente o voltaje, en lugar de desplazamientos de partículas de aire, cuerdas, membranas, etc.

En esta forma el theremín al igual que cualquier otro instrumento que genere sonidos partiendo de la electricidad, es producir o generar una corriente eléctrica que pueda oscilar de acuerdo con lo requerido. Estas oscilaciones eléctricas son frecuencias audibles, que al momento de ejecutar en un parlante o auriculares estos lo harán vibrar mecánicamente y lo percibiremos como sonidos en diferentes frecuencias [9].

2.3.3 Circuitos Oscilantes

Un oscilador es un sistema que crea perturbaciones o cambios periódicos en un medio, ya sea este un medio material (sonido) o campo electromagnético (ondas de radio, microondas, infrarrojo, etc.). Los circuitos osciladores producen una forma de onda continua, repetida y alterna sin ninguna entrada. El nombre de oscilador se formar por el conjunto del circuito oscilante, el amplificador y la red de alimentación [8].

Las leyes de la física conducen a que la frecuencia de oscilación está dada por siguiente ecuación:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

Entonces es aquí la importancia de los valores de inductancia (L) y capacitancia (C). Para obtener una frecuencia con una corriente oscilante que dependerá del valor de la bobina y capacitor, como se muestra en la ecuación de la figura 3. Para hacernos una idea práctica digamos que un inductor típico utilizado en los osciladores tiene valores de inductancia desde 1 nH hasta unos 10 mH. Para que la oscilación en el circuito LC coincida con la frecuencia fundamental de la nota musical **LA** ($f = 440$ Hz), se requeriría un inductor de 1 mH. un capacitor de capacitancia $C \approx 140 \mu F$, de acuerdo con la expresión de la figura 3, si se requiere reproducir otra nota musical se deberá variar la capacitancia [8].

2.4 CAPACITANCIA DEL SISTEMA ANTENA-MANO

Un capacitor constituye un dispositivo electrostático conformado por dos electrodos conductores dispuestos a una distancia definida y separados por un dieléctrico, que es un material no conductor. Tal es el caso de una antena y la mano de alguien en su proximidad, lo que viene especialmente al caso del theremin porque posee una antena vertical, que forma un capacitor con el cuerpo del interprete (conexión “a tierra”). Al sólo efecto de hacer un cálculo aproximado para dar una idea de su magnitud, daremos la expresión para la capacitancia entre una antena cilíndrica de longitud h y diámetro D , y la mano que se encuentra a una distancia X de la antena. Asumiendo que el ancho de la palma de la mano es del orden de $(h/10)$, tendremos aproximadamente.

$$C_A \cong \frac{2\pi\epsilon_0 h}{10 \ln \left(\frac{4x}{D} \right)} \quad (2)$$

Donde ϵ_0 es una constante del electromagnetismo, y la función (\ln) es el logaritmo neperiano de la cantidad que está en paréntesis. En la ecuación se asume que, Si bien esta expresión está deducida para una antena horizontal, en tanto que la antena que regula la frecuencia en el theremin es vertical, su aplicación igual sirve para obtener la capacitancia aproximada [9].

2.4.1 Distancia de la Mano

Se resalta que la capacitancia depende de la distancia X entre la mano y la antena. Deduciendo los valores típicos de un theremin, se dice que $h \approx 0.5 \text{ m}$, $D \approx 0.01 \text{ m}$, $x \approx 0.2 \text{ m}$. Haciendo cálculos mediante la ecuación de la figura 4 obtenemos que para la capacitancia del sistema antena-mano el valor aproximado de $C_A \approx 0.6 \text{ pF}$ lo cual es una cantidad muy pequeña. Entonces cuanto más cerca está la mano de la antena, su capacitancia es mayor. Esto es un comportamiento general de los capacitores, a menor distancia entre ambos conductores, mayor es la capacitancia. De esta forma, la capacitancia total C que determina la frecuencia de las oscilaciones en la expresión será: $C(x) = C_0 + C_A(x)$. [5]

Como consecuencia, se observa una modulación de la frecuencia en el circuito oscilante conforme el ejecutante mueve su mano hacia o desde la antena.

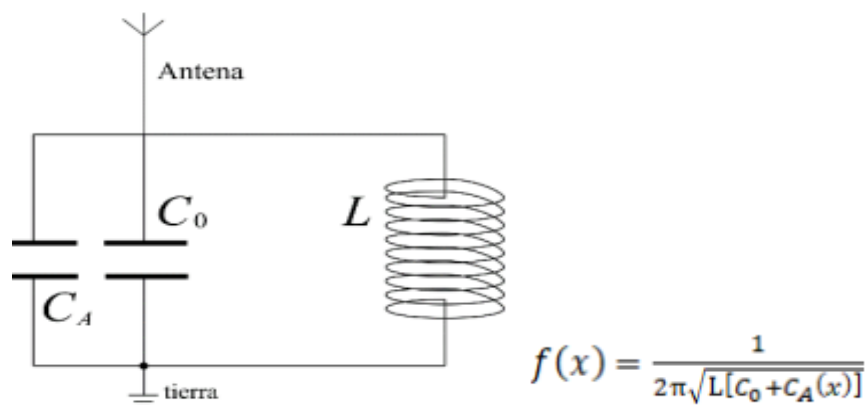


Figura 3: Capacitancia C_A introducida por el conjunto antena-mano en paralelo con C_0 .

2.5 PRINCIPIO HETERODINO

En la rama de telecomunicaciones, el termino heterodino tiene 2 significados que son:

1. Generar nuevas frecuencias a través de la mezcla de 2 o más señales en un dispositivo no lineal, como un diodo, una válvula termoiónica o un transistor.
2. La frecuencia resultante de la mezcla de dos o más señales en un dispositivo no lineal se la denomina heterodino [8].

La aplicación de este principio en el theremín está en que gracias a los 2 osciladores que se utilizan podemos producir la señal heterodino, cabe recalcar que esto se produce por la mezcla de estas señales las cuales dependen de uno oscilador fijo que se encuentra en el rango de los 285 kHz y otro variable que dependerá de la proximidad de la mano hacia la antena de tono o volumen esta oscilación va a variar entre los 282 kHz a los 285 kHz. Mediante estas dos señales se obtiene la frecuencia resultante que va a ser amplificada y que está dentro del rango audible del oído humano [7].

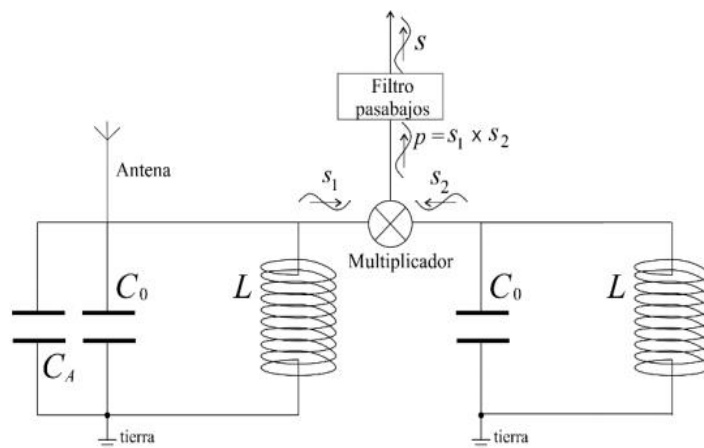


Figura 4: Construcción de la señal heterodino $p(t)$ por el producto de $S_1 \times S_2$ y filtrado para obtener la señal $S(t)$ que tiene la frecuencia de audio

2.5.1 Control de Volumen

Para ejecutar el control de volumen del instrumento esta se lo realiza variando la capacitancia que se genera entre la mano del ejecutante y la antena. Se basa en el mismo principio que el control de tono ya analizado, lo cual significa que el movimiento de la mano produce una señal de frecuencia variable, como la indicada con $s(t)$ en la parte superior de la Figura 6 a la salida del filtro pasa bajos.

La idea consiste en utilizar otra señal de frecuencia variable, dependiente de la posición de la mano, para generar un voltaje de amplitud variable. Entonces esta amplitud es utilizada para amplificar o atenuar la señal $s(t)$, lo que nos permite aumentar o disminuir el volumen de salida dependiendo del movimiento de la mano sobre la antena [12].

2.5.2 Salida de Audio

El circuito de salida de audio del Theremin puede variar según el diseño específico del instrumento. Sin embargo, a menudo se utiliza un circuito amplificador para amplificar la señal generada por el oscilador Theremin para producir el sonido deseado.

Los diseños de circuitos amplificadores específicos pueden variar según el dispositivo en cuestión y las preferencias del diseñador [29]. Dependiendo de los requisitos de potencia y calidad del sonido, se pueden utilizar diferentes tipos de amplificadores, como amplificadores de clase A, amplificadores de clase AB o amplificadores de potencia. También se utilizan componentes pasivos como resistencias y condensadores para ajustar la ganancia y las características del amplificador [30].

El altavoz produce sonido como resultado de las vibraciones generadas por la señal de audio amplificada (Figura 5).

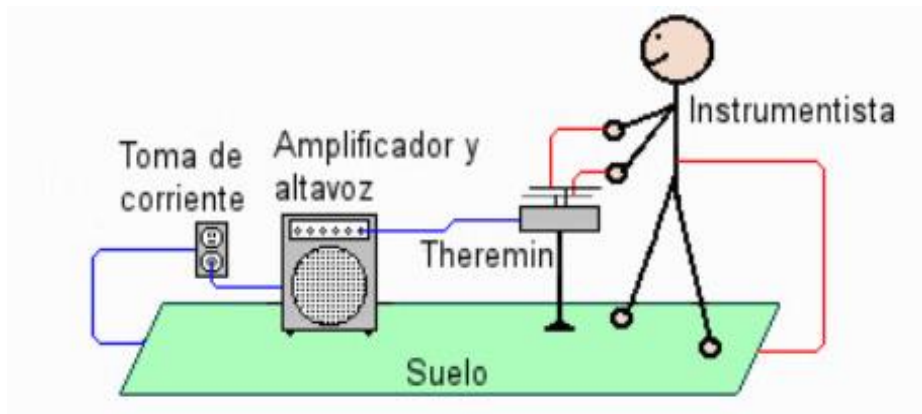


Figura 5: Conexión de salida de audio mono del theremín a un amplificador.

3. CAPÍTULO III. METODOLOGIA

En este capítulo se describen todos los aspectos metodológicos que rigen y realizan la investigación, considerando el tipo de investigación, los métodos de investigación, los procedimientos, el análisis, las poblaciones de estudio y los tamaños de muestra, así como los métodos analíticos y de procesamiento de datos.

3.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN

En este presente proyecto se planteó evaluar el uso de un instrumento theremín electrónico en la creación de música popular y música clásica y su efecto en la calidad del sonido.

Este proyecto se realizó en base a los diferentes procesos que se deben de tomar para analizar el método heterodino y los circuitos osciladores, para ello, se generó osciladores fijos y variables para la obtención de frecuencias audibles al oído humano.

Para el desarrollo de este proyecto, se realizó una investigación tipo descriptiva y experimental, por lo que, se basa en los circuitos eléctricos oscilantes, el sonido y vibraciones eléctricas para obtener la frecuencia de cada nota musical. El objetivo de la implementación de este proyecto es mejorar el estudio musical y electrónico, realizar un circuito más compacto, la comprensión y análisis de las frecuencias. Los resultados son obtenidos por medio de variables cuantitativas.

3.2 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

Esta investigación se desarrolló en 3 fases, como se muestra en la figura 6.

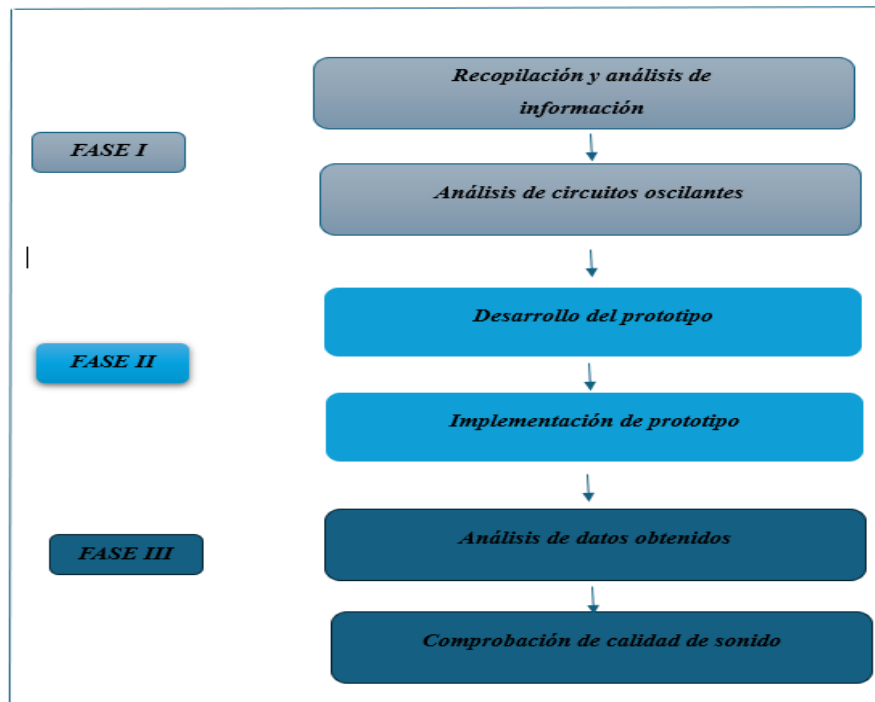


Figura 6: Diseño de la investigación.

- Estudiar el instrumento de theremín mediante análisis e investigación de bibliografía especializada para entender su funcionamiento y diseño interno el instrumento para una buena fiabilidad al momento de diseñar.
- Diseñar e Implementar un instrumento theremín electrónico que funcione dentro del rango frecuencias de 168hz a 170khz que son los rangos del oído humano y el rango de funcionamiento de este instrumento.
- Evaluar el uso del instrumento de theremín electrónico en la creación de música clásica y popular y el efecto de este en la calidad de sonido a través del análisis de frecuencias en un lugar adecuado para el uso y ejecución de una interpretación melódica en ambientes controlados.

3.3 MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

3.3.1 Investigación Descriptiva

La investigación descriptiva permite realizar las características o rasgos sobre el objeto de estudio, lo que nos permite seleccionar las características fundamentales y su descripción detalladas sobre la investigación a realizar [9]. La investigación descriptiva busca especificar las propiedades importantes del proyecto que está sometido al análisis, por lo tanto, permite determinar cuál es el objeto de estudio, además, de los instrumentos que se necesitan para el objeto de estudio [13].

En base a la investigación descriptiva, en el proyecto, permitió conocer los datos obtenidos que corresponde al tono en función de la frecuencia, en este caso se encuentran en la nota adecuada para que el intérprete tenga la fiabilidad de realizar una interpretación musical correcta.

3.3.2 Investigación Experimental

La investigación experimental según Fideas Arias nos define como “un proceso que consiste en someter a un objeto o grupo de individuos a determinadas condiciones, estímulos o tratamientos, para observar los efectos o reacciones que se producen [14]. La investigación experimental permite al investigador manipular las variables existentes en el estudio, para así, poder controlar su efecto o conducta sobre la investigación [15].

En el proyecto realizado, se implementó la investigación experimental, para así poder observar los resultados que se dan a la hora de manipular la variable independiente con respecto a la variable dependiente. Este proyecto es de carácter experimental en vista de la variación de las líneas melódicas.

3.4 TECNICA DE RECOLECCION DE DATOS

3.4.1 Fuentes de Información

Durante el desarrollo de este proyecto se ha realizado la revisión sistemática de la literatura, recopilando y recuperando información de diversas bases de datos científicas y bibliotecas virtuales, por ejemplo:

- Proquest
- IEEE Xplorer
- Scopus
- Springer

Incluyendo recuperación, revisión y análisis de trabajos relevantes con respecto al instrumento theremín, circuitos oscilantes, osciladores fijos, variables, amplificadores, antenas y método heterodino. Todo correspondiente al tema de investigación para su efectivo desarrollo.

3.4.2 Instrumento de Recolección de Datos

El instrumento para la recolección de datos fue el analizador de espectro que nos mostró la forma de onda y mostraba la frecuencia que generaba el prototipo, además para saber si el prototipo estaba afinado se utilizó un afinador cromático donde nos indicaba las notas que se ejecutaban y por ultimo para un análisis en cuanto a calidad de sonido y forma de onda se realizó una comparación entre el theremín y el piano generando un línea melodía igual para los dos instrumentos y se la analizo mediante el programa REAPER, este programa es utilizado para el procesamiento de audio, sonido y verificación de la calidad mediante una grabación de audio a nivel semiprofesional.

Mediante estos 3 procesos logramos comparar las frecuencias y notas correspondientes dentro de sus rangos establecidos para el oído humano.

3.5 POBLACION DE ESTUDIO Y TAMAÑO DE LA MUESTRA

3.5.1 Población

En este proyecto de investigación la población está constituida por los valores de frecuencia que produce el prototipo al interpretar diferentes líneas melódicas en un ambiente controlado.

Se generaron dos tipos de líneas melódicas, una clásica y una popular o experimental, por tanto, la población está compuesta por datos generados a partir de estas líneas, dando como resultado un total de 110 datos para la música clásica y 144 datos para la música popular o experimentales. Teniendo así en general un total de 254 frecuencias como datos resultantes de las líneas melódicas.

3.5.2 Muestra

Para realizar el desarrollo de análisis de frecuencia se consideró todos los datos obtenidos en la población.

3.6 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLE

En las siguientes tablas se detalla la variable dependiente como la independiente que fueron estudiadas en la investigación.

3.6.1 Variable Dependiente

Tabla 1: Variables Dependientes.

Variable	Concepto	Unidad
FRECUENCIA	La frecuencia de resonancia es determinada por un grado de oscilación que influye directamente en la calidad de sonido.	Hz

3.6.2 Variable Independiente

Tabla 2: Variables Independiente.

Variable	Concepto	Unidad
Tipo de música	todo tipo de música está determinada por el tiempo, ritmo, armonía y melodía que son los componentes primordiales de cada género.	Tipo: clásica y popular

3.7 MÉTODOS DE ANÁLISIS, Y PROCESAMIENTO

3.7.1 FASE I: BÚSQUEDA Y ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO DE THEREMÍN

En esta primera fase se realizó una búsqueda de información sobre la tecnología y mecanismos de un theremín, se analizó los diferentes diseños, su física y la electrónica que estos poseen y se realizó un mecanismo apropiado para su diseño.

Esta tesis ha tomado como referencias los distintos trabajos e investigaciones realizados en diferentes tipos de theremín para poder entender su configuración y su física.

Theremín clásico

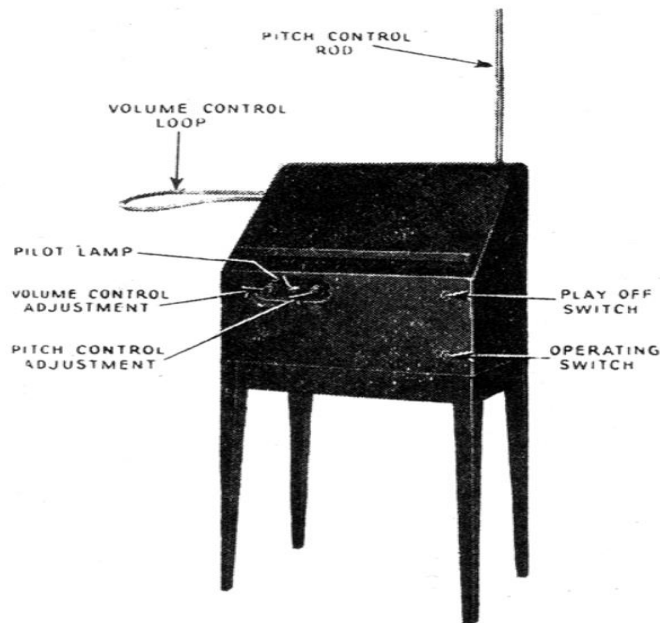


Figura 7: Primer Theremín analógico.

Este es el diseño original creado por físico Lev Termen conocido como Leo Theremín, este diseño era analógico que poseía válvulas para las oscilaciones.

Características

Este instrumento utiliza dos antenas, una para el control de volumen que se encuentra en forma horizontal y otra antena vertical para la frecuencia, estas antenas eran de metal.

El instrumento contaba con osciladores de alta frecuencia para el volumen y pitch, Este theremín incorporaba una electrónica compleja que incluía válvulas de vacío, resistencias, condensadores y otros componentes que ayudaban a generar, modular y amplificar las señales eléctricas que producen el sonido.

Por lo general este instrumento de Lev Termen era grande por los elementos utilizados y su sonido era único y distintivo [6].

Theremín transistorizado (ETHERWAVE)



Figura 8: Theremín de Moog.

Este diseño fue construido por el Dr. Robert Moog y lo nombro como Etherwave, esta conserva las características básicas del instrumento clásico, pero con algunas mejoras y adaptaciones propias del enfoque de Moog en la síntesis electrónica.

Características

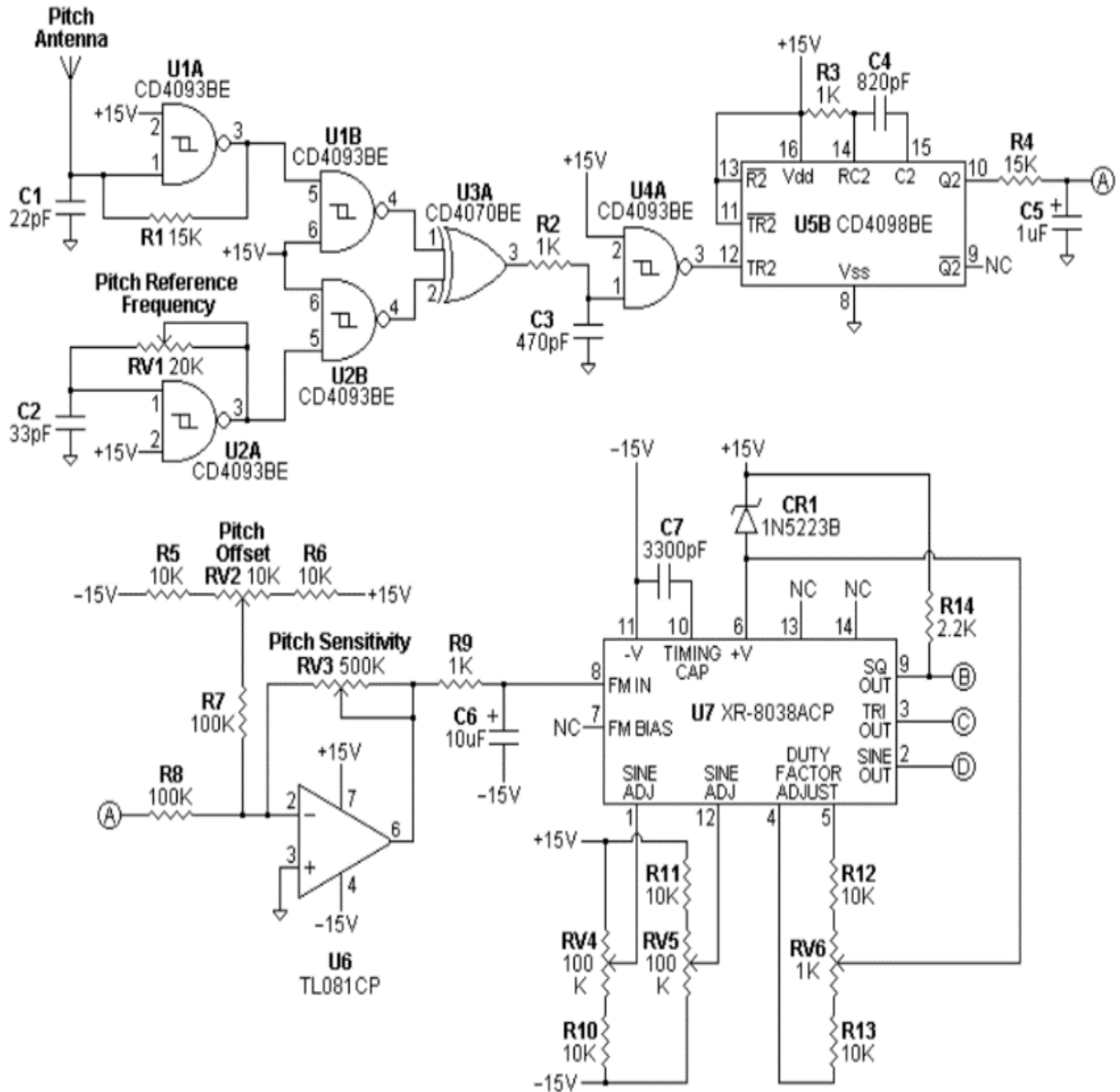
En lugar de utilizar válvulas de vacío el Etherwave utiliza transistores para su funcionamiento, esto ayudaba a tener una construcción más compacta, una mayor durabilidad y una menor generación de calor a comparación del theremín clásico que utilizaba válvulas.

Etherwave presenta circuitos diseñados por Robert Moog que garantiza una respuesta más estable y precisa en comparación al clásico theremín, además posee un ecualizador donde se puede ajustar el tono volumen y afinación del instrumento, este posee una salida de audio que facilita la conexión a amplificadores u otros equipos de audio.

Este diseño es una versión moderna y mejorada del theremín que conserva su esencia, mientras incorpora las innovaciones de Robert Moog en la síntesis electrónica y la ingeniería de audio [5].

THE GLASGOW DIGITAL THEREMIN

UNIVERSITY OF GLASGOW DIGITAL THEREMIN



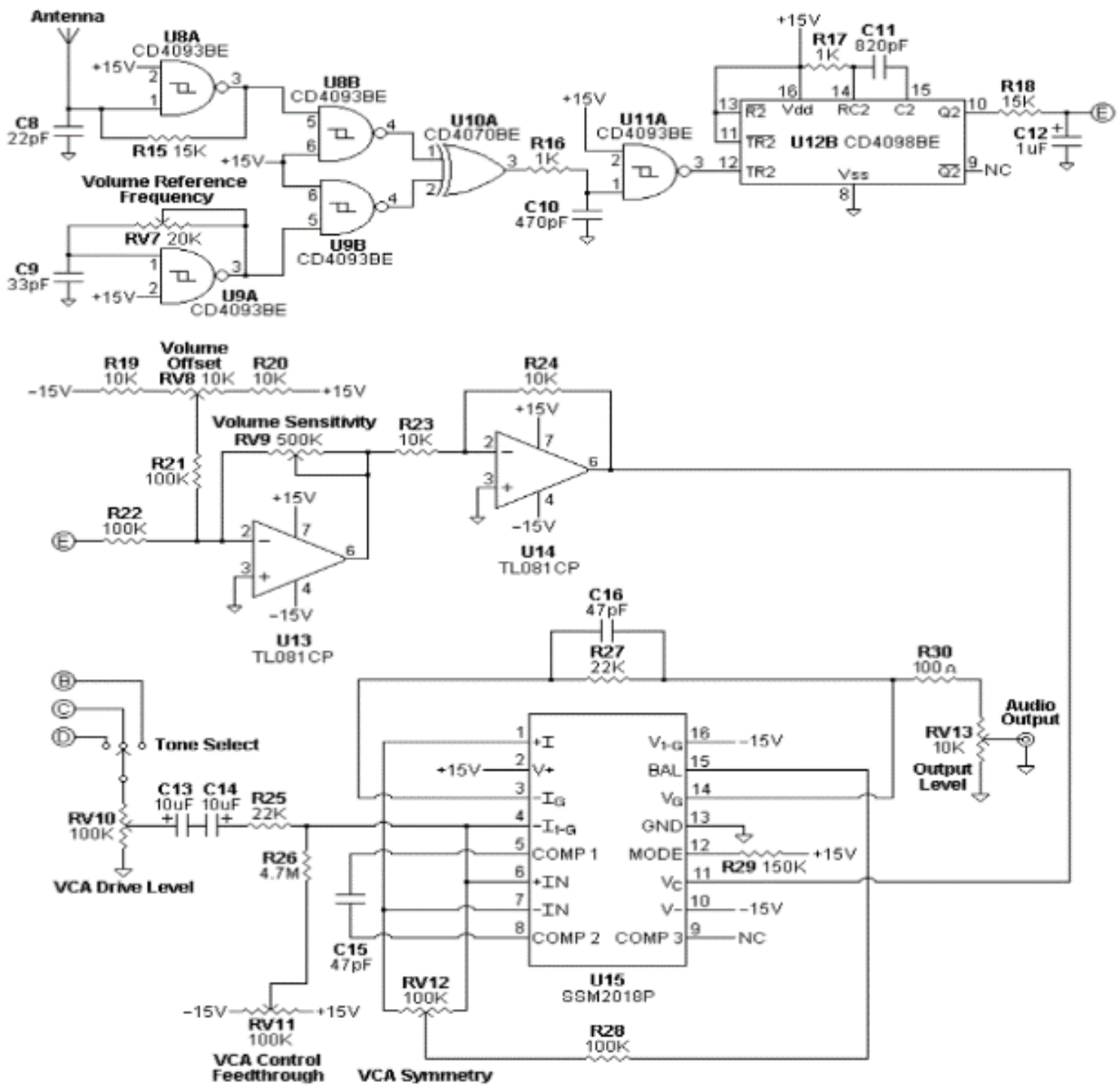


Figura 9: Diseño de circuito theremín.

Este diseño de theremín fue desarrollado por la Universidad de GLASGOW, Reino Unido, este presenta varias características únicas a comparación del theremín clásico.

Características

Este a diferencia del clásico theremín que utilizaba circuitos analógicos utiliza componentes digitales, para el control y generación del sonido, esto puede incluir microcontroladores, convertidores analógico-digital (ADC) y convertidores digital-analógicos (DAC).

Este al ser digital presenta una mayor precisión y estabilidad en el sonido en comparación a los theremines analógicos, Además la flexibilidad de programación que podría incluir la capacidad de cambiar de escalas musicales y ajustar los parámetros del sonido.

Al ser digital posee la fácil incorporación de una interfaz de usuario que ayuda al control y configuración del instrumento, la conectividad digital mediante USB o MIDI para actualizaciones o mantenimiento del software.

Theremín Ultrasónico



Figura 10: Theremín Digital.

Este theremín fue realizado en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos en la facultad de Ingeniería Electrónica.

Este diseño es más moderno y actual puesto que utiliza la tecnología moderna para realizar los sonidos de un theremín, siendo un sonido digital y ya no analógico generando pulsos para dar la nota u sonido.

Características

Este theremín su característica principal es el control mediante DSP que se encarga de procesar las señales de los sensores y genera salida de audios correspondientes a un tono o nota y para su circuito de proximidad utiliza los sensores ultrasónicos remplazando así a las antenas del clásico theremín que ayudaban a la ejecución del tono, el dispositivo cuenta con una interfaz de usuario que permite calibrar los sensores, el tono, la sensibilidad u otras configuraciones relacionadas con el sonido [10].

Selección de Diseño

Para el diseño del instrumento, se decidió crear un theremín compacto que ofreciera una calidad de sonido óptima, manteniendo a su vez un equilibrio adecuado entre costos y materiales. Se baso en el modelo Etherwave, realizando mejoras significativas en la respuesta de frecuencia y la reducción de ruido. Para lograrlo, se empleó una combinación de amplificadores operacionales, transistores, condensadores, circuitos LC, antenas e integrados. La decisión de utilizar estos componentes se fundamentó en la documentación detallada disponible sobre diversos parámetros del instrumento, así como en el conocimiento de una electrónica no demasiado compleja. Estos elementos respaldan la viabilidad técnica del theremín diseñado.

3.7.2 FASE II: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO

En esta fase se realizó el diseño del prototipo, llevando a cabo todo el circuito electrónico del instrumento como osciladores fijos y variables, sistema de proximidad y amplificadores que son los aspectos fundamentales del prototipo. Teniendo claro esto se ejecutó el diseño

correspondiente y se seleccionaron los componentes adecuados para utilizar en la implementación del prototipo.

Diseño del prototipo

Para el diseño del instrumento theremín, se tomó como base el diseño ETHERWAVE de Robert Moog [5] el cual se generó ciertas modificaciones como el porte del instrumento, el tipo de antenas y se conservó la parte de control de volumen y pitch del prototipo, incluyendo el tipo de alimentación y salida de audio mono, además de un orificio donde se lo pueda colocar el instrumento en este caso un pedestal de micrófono.

Diseño del diagrama de Electrónico

Para llevar a cabo el diseño electrónico se desarrolló el diagrama propuesto en la Figura 11, en el cual posee 10 etapas, que se describirán posteriormente.

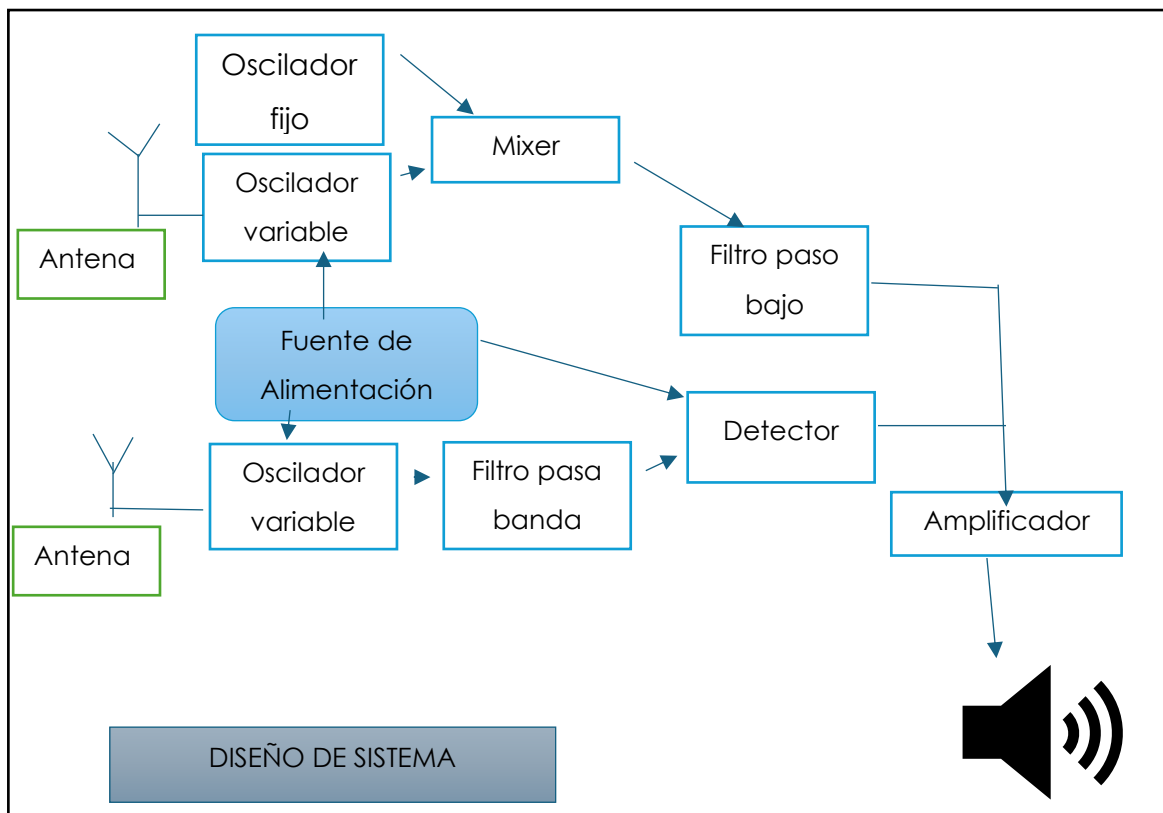


Figura 11: Diseño del Sistema theremín.

Fuente de Alimentación

Para la alimentación del sistema se eligió un adaptador de 12 voltios de corriente continua (Figura 12), ya que el sistema no requiere de altos voltajes para su funcionamiento, se optó por un adaptador, generando así un theremín más ligero y compacto.



Figura 12: Fuente de Alimentación - Adaptador.

OSCILADORES

Para el desarrollo de los osciladores tanto como fijos y variables ocupamos circuitos integrados que poseen una gran efectividad al momento de respuesta de señal, además de trabajar con cargas estáticas.

Los Circuitos Integrados utilizados como osciladores son:

MC14069UBCP

Este integrado es fabricado generalmente por motorola y On Semiconductor y ofrece una serie de características dependiendo del uso que se lo de, tiene protección a descargas electroestáticas además de compatibilidad TTL/CMOS lo que le hace versátil y su bajo consumo de energía.

La aplicación del circuito de un oscilador de frecuencia estable, además de buffer para amplificar las señales, este integrado es un inversor hexagonal esto debido a que posee 6 puertas inversoras independientes, también una de las características es que tiene una alta velocidad de conmutación y ofrece tiempos de respuesta rápida, trabaja con una baja impedancia de salida lo que ayuda a un buen manejo de corriente y alta inmunidad al ruido (Figura 13).

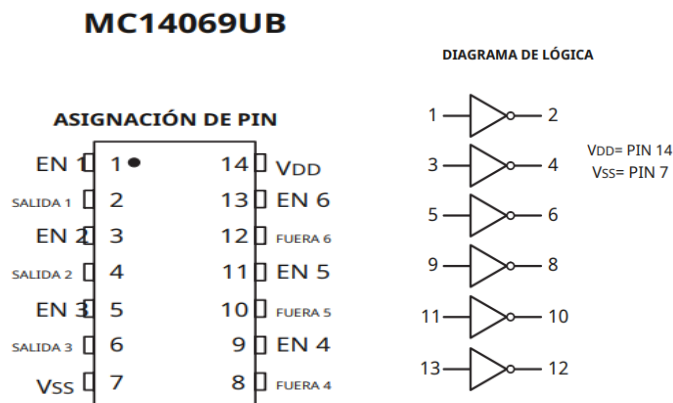


Figura 13: Circuito Integrado MC14069UBCP.

MM74C14N

Este circuito integrado pertenece a la familia de los chips TTL. Es conocido como un inversor Schmitt Trigger este al igual que el circuito integrado anterior figura 15. Es hexagonal al poseer 6 puertas inversoras independientes, una de las características relevantes de este circuito es la histéresis controlada ya que a través de los valores de las resistencias y el nivel de voltaje de referencia esta es ajustable a lo requerido Figura 14.

La aplicación del integrado es como oscilador ya que tiene la capacidad de generar señales de frecuencia de salida estable, esto gracias al diseño de Schmitt Trigger ya que el chip es más resistente al ruido a comparación de un inversor estándar, además su velocidad de operación es muy rápida. [10]

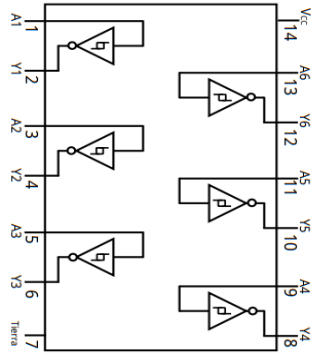


Figura 14: Circuito Integrado MM74C14N.

OSCILADORES DE PITCH

Oscilador Fijo

Para realizar un oscilador fijo que este entre los 100 Hz hasta los 3Khz, realizamos un tipo de oscilador de relajación o conocido como astable.

En este oscilador el condensador y la resistencia forman un circuito de retroalimentación hacia el inverso utilizado que es el MM74C14N, lo que nos produce una señal de oscilación fija.

Construcción

Para la construcción del oscilador se debe determinar la frecuencia en la cual estará el oscilador este caso una frecuencia de 260 KHz.

Donde el cálculo para las resistencias y capacitores del oscilador se lo realiza con la fórmula de un oscilador RC.

$$f = \frac{1}{2\pi RC} \quad (3)$$

Donde:

F: frecuencia, R: resistencia, C: condensador.

Obtenidos los valores de estos componentes (Anexo 1) el diseño del oscilador con inversor es como se muestra en la Figura 15.

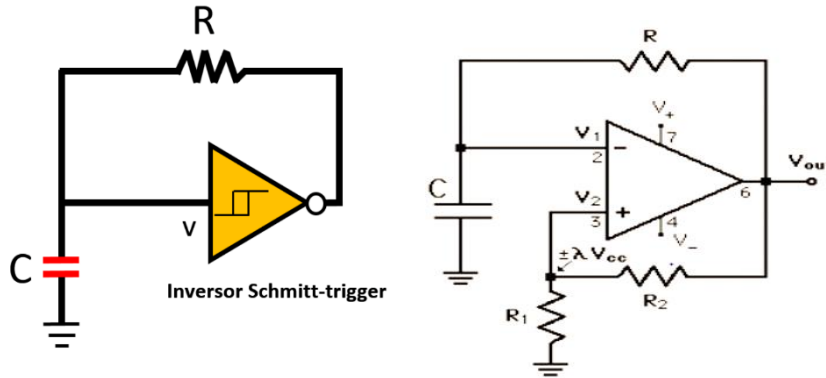


Figura 15: Diseño de un Oscilador con Inversor.

Oscilador de VCO

Para realizar un oscilador variable o de VCC que este dentro del rango de frecuencia que se establece, al igual que el anterior realizamos un de oscilador de relajación o conocido como estable.

En este oscilador el condensador y la resistencia forman un circuito de retroalimentación hacia el inverso, lo que nos produce una señal de oscilación, para este oscilador la parte de capacitancia no es fija, y está dada en que la capacitancia va a variar mediante la distancia de la mano hacia la antena.

Construcción

Para la construcción del oscilador se debe determinar la frecuencia en la cual estará el oscilador este caso una frecuencia de 257- 260 KHz.

Donde el cálculo para las resistencias y capacitores del oscilador se lo realiza con la fórmula de un oscilador RC (Figura 18) pero donde C no es un valor fijo.

Donde:

F: frecuencia, R: resistencia, C: capacitancia producida entre la mano y la antena.

Obtenidos los valores de estos componentes (Anexo 2) el diseño del oscilador con inversor es como se muestra en la Figura 16.

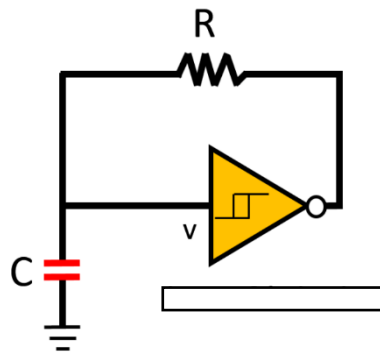


Figura 16: Oscilador con Schmitt- trigger.

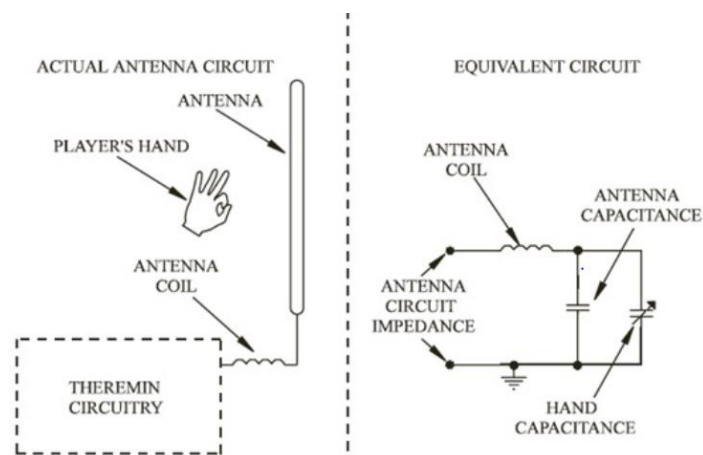


Figura 17: Diagrama de funcionamiento de la capacitancia.

OSCILADOR DE VOLUMEN

Oscilador VCO

Para el oscilador de volumen al igual que el oscilador variable o de VCO del pitch ocupa el mismo diseño y las mismas características ya que al igual que el anterior este varía dependiendo la distancia de la mano hacia la antena. este oscilador es de control y permite

cortar la amplitud y así afectando a la parte del volumen de salida, pasando por un proceso de demodulación.

DETECTOR DE PROXIMIDAD

El detector de proximidad del theremín es de forma conductiva, que generalmente está presente en el circuito de los osciladores VCO, ya que al ser variable este depende de la proximidad de acercar o alejar un objeto conductor, como la mano del usuario hacia la antena de tono o volumen del theremín.

La acción de acercar o alejar la mano de las antenas produce la proximidad (figura 18), produciendo así una variación en la señal eléctrica y provocando el cambio de frecuencia o tono, esto debido a que la antena y la mano forman un condensador variable, este está conectado a tierra mediante el pie del interprete.



Figura 18: Movimiento y posicionamiento de la mano.

Tabla 3: Datos detector de proximidad.

Ítem	Descripción
Funcionamiento	Variación de capacitancia entre una antena y un objeto conductor cercano como la mano.
Sensibilidad	Alta sensibilidad a objetos conductores.
Rango de Detección	Entre uno 5 a 40 cm

Configuración	Circuito Integrado – Inversor
----------------------	-------------------------------

ANTENAS

Antena de Pitch

Para la antena de tono o llamada también pitch, se utilizó una antena de tipo monopolo de aluminio (Figura 19), esta se asemeja a una antena de televisión simple. La antena en si no produce el sonido o tono por sí mismo, pero es fundamental para determinar la frecuencia de tono que emite el instrumento mediante el circuito de oscilador VCO.



Figura 19: Antena Monopolo Vertical.

Tabla 4: Datos característicos antena monopolo vertical.

Ítem	Descripción
Tipo	Antena monopolo Vertical.
Diseño	Posee un único elemento radiante vertical.
Longitud del elemento	$\lambda/4$.
Directividad	Omnidireccional en el plano vertical.
Impedancia	50-75 ohmios.

Antena de Volumen

Para la antena de control de volumen, se utilizó una antena de tipo monopolo de cobre en forma de bucle (Figura 20), esto se refiere a una curva cerrada, Esta antena al igual que la

de tono es fundamental para determinar el nivel de volumen del instrumento, esto gracias al detector de proximidad que posee theremín y el oscilador VCO.



Figura 20: Antena Monopolo forma de Bucle.

Tabla 5: Datos característicos antena bucle.

Ítem	Descripción
Tipo	Antena monopolo de Bucle
Diseño	El bucle es el elemento radiante de la antena.
Longitud del elemento	$\lambda/4$.
Directividad	Omnidireccional en el plano horizontal
Impedancia	50-75 ohmios.

MIXER

En un theremín el proceso de un mixer es crucial ya que permite producir el tono audible, esto debido a que genera una señal intermedia entre dos señales de frecuencia.

Método Heterodino

Para realizar la fase de heterodinación del theremín se realizó un mezclador de frecuencias, que contiene 2 entradas de señal, y que la suma de ellas nos genera una salida de señal intermedia la cual se utiliza para generar el tono audible (Figura 21).

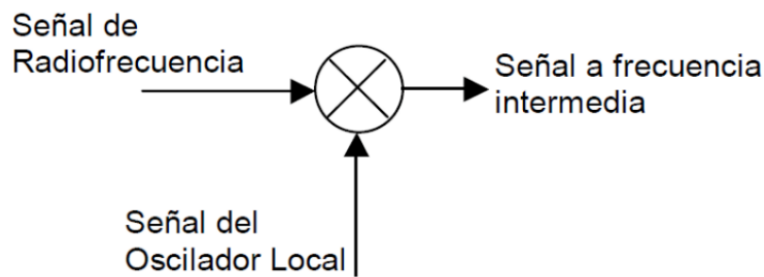


Figura 21: Sistema Mixer de señal.

Mezclador con Diodos

Para el mezclador se utiliza 2 diodos 1N4148 en una forma de configuración balanceada, donde la señal de frecuencia variable (RF) y la frecuencia fija (LO) son conectadas a las entradas de la configuración balanceada, la señal resultante que de la diferencia y suma de frecuencias de entradas se obtiene de la carga conectada entre los diodos.

Tabla 6: Datos de Diodo Rectificador.

Ítem	Descripción
Tipo	No lineal.
Diseño	Diodo de silicio.
Corriente máxima directa	200 mA.
Capacitancia	4 pF a 1Mhz.
Tiempo de recuperación	4 ns.

FILTROS

Filtro paso bajo – Pitch

Para el filtro pasa bajo utilizamos un inversor de los Circuitos integrados antes ya mencionados en los osciladores, este filtro es activo ya que utilizamos inversores que nos permite un control y una precisión alta en la característica del filtrado.

El filtro activo está configurado con inversores y componentes de retro alimentación como resistencias y condensadores (Figura 22), que permiten el corte y la atenuación de las frecuencias más altas. Los valores de las resistencias y condensadores varían dependiendo del tipo de filtro paso bajo

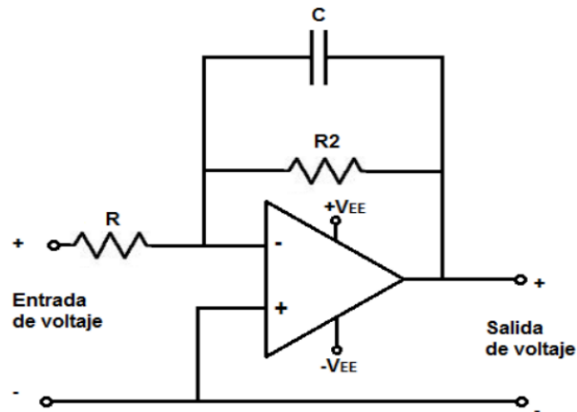


Figura 22: Diseño filtro pasa bajo.

Tabla 7: Datos Filtro Activo paso bajo.

Ítem	Descripción
Tipo	Filtro Activo.
Diseño	Filtro paso bajo activo.
Orden de filtro	Primer orden.
Respuesta de frecuencia	Atenuación en frecuencias altas y paso de frecuencias bajas
Componentes	Inversor, resistencia, capacitor

En este caso el rango de frecuencia baja a trabajar es de los 100Hz. Para ello se calculan los valores de las resistencias y capacitores para esta frecuencia.

Filtro pasa banda – Volumen

Para el filtro pasa banda al igual que el filtro paso bajo, utilizamos un inversor de los Circuitos integrados antes ya mencionados en los osciladores, de igual manera el filtro es

activo ya que utilizamos inversores que nos permite un control y una precisión alta en la característica del filtrado.

El filtro activo pasa banda está configurado con inversores y componentes de retro alimentación como resistencias y condensadores (Figura 23), que permiten definir el rango de frecuencias que se desea pasar, poniendo límites de frecuencias bajas y altas.

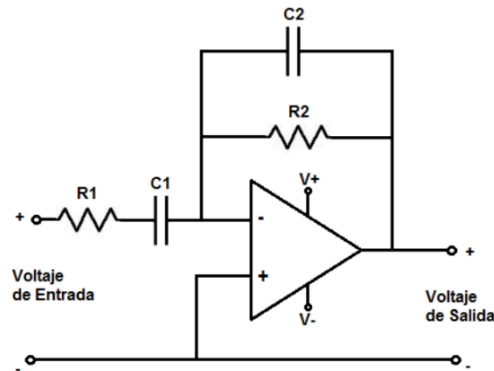


Figura 23: Filtro pasa banda.

Tabla 8: Datos filtro activo pasa banda.

Ítem	Descripción
Tipo	Filtro Activo.
Diseño	Filtro pasa banda activa.
Orden de filtro	Primer orden.
Respuesta de frecuencia	Pasan frecuencias dentro del rango, frecuencias fuera del rango atenuadas.
Componentes	Inversor, resistencias, capacitores

En este caso el rango de frecuencia a trabajar es de los 100Hz hasta los 20KHz. Para ello se calculan los valores de las resistencias y capacitores para estas frecuencias.

AMPLIFICADOR Y SALIDA DE AUDIO

Para la parte del amplificador y salida de audio, ocupamos un transistor 2N4401(Figura 24), este configurado como un amplificador de base común (Figura 25). Se eligió este diseño porque siempre la señal de entrada y salida se encuentran en la fase.

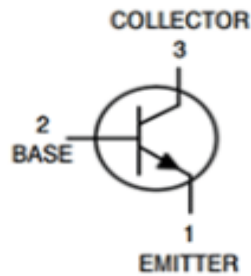


Figura 24: Transistor 2N4401.

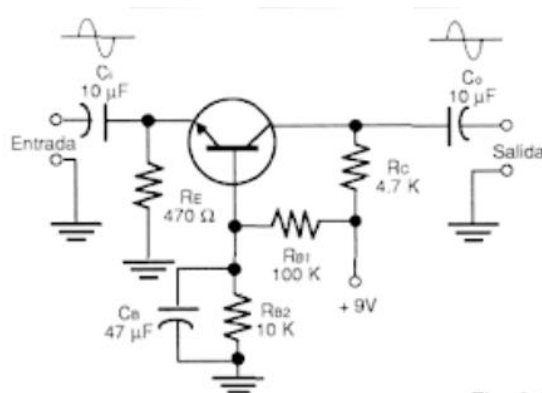


Figura 25: Diseño del Amplificador Base común.

Este circuito presenta una baja impedancia de entrada con una alta salida de impedancia, esto gracias a que los condensadores C_i y C_o actúan como condensadores de acoplo, que permiten eliminar el nivel de corriente continua ya sea a la entrada o salida del transistor y poder así dar paso solo a las señales de audio.

Tabla 9: Características amplificador base común.

Ítem	Descripción
Diseño	Amplificador de base común.
Tipo	Transistor NPN - 2N4401.
Potencia máxima Disipada	625 mW.
Impedancia de Salida (Z_{out})	Alta en el rango de $k\Omega$
Salida de audio	Jack Hembra de 3.5 mm

IMPLEMENTACION DE PROTOTIPO

Con todos los procesos y componentes mencionados anteriormente, el diagrama electrónico del sistema queda como se aprecia en la Figura 26.

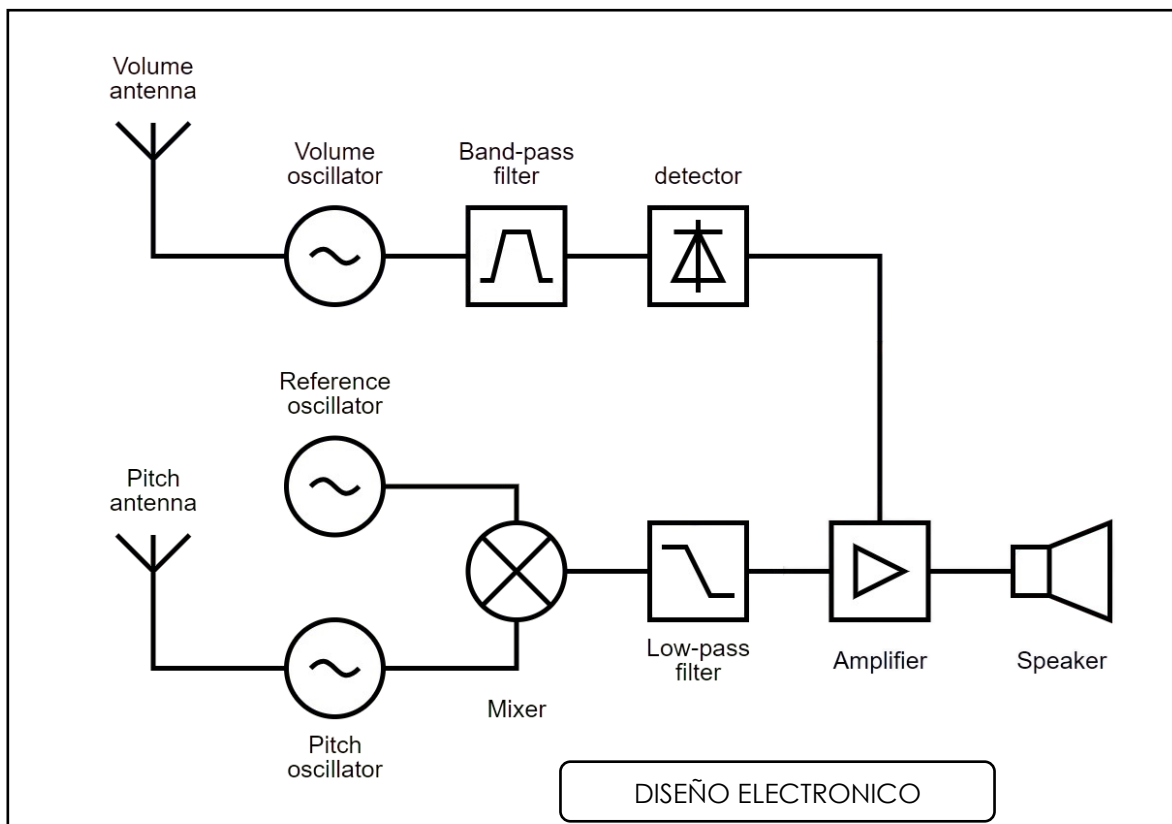


Figura 26: Diseño del diagrama Electrónico del theremín.

ELEMENTOS ELECTRONICOS

Tabla 10: Características de los elementos electrónicos del prototipo.

ELEMENTOS	DESCRIPCION
C.I MM74C14N	Disparador Hex Schmitt, Protección a descargas eléctricas e inmunidad al ruido.
C.I MC14069UBCP	Inversor, tecnología CMOS, 6 puertas lógicas independientes, velocidad de conmutación.
ANTENA VERTICAL	Monopolo, omnidireccional, impedancia 75 ohmios.
ANTENA BUCLE	forma cerrada, omnidireccional, monopolo
ADAPTADOR 12V DC	Output 12 DC, 100mA.
POTENCIOMETRO	Resistencia variable.
RESISTENCIA	Diferentes valores desde los 100 ohmios hasta 1M dependiendo su uso.
CONDENSADOR CERAMICO	No contiene polaridad, dieléctrico.
CONDENSADOR ELETRIOLITICO	Contiene polaridad, mayor capacidad de valor de capacitancia.
CONDENSADOR POLIESTER	no posee polarización, excelente factor de potencia.
CONDENSADOR VARIABLE	Posee un rango de capacitancia que ayuda a ser variado según se lo necesite.
CONDENSADOR DE PRESICION	Este condensador es de calibración ya que su precisión de valor ayuda a la estabilidad.
DIODO ZENER	No Lineal, de silicio.
TRANSISTOR	Amplificador operacional.
INDUCTOR	Bobina de bajo valor generalmente en mili henrios.
JACK HEMBRA 3.5 mm	Conexión a la salida de audio.

CONECTOR HEMBRA DE BANANA	Permite la conexión a la antena bucle del oscilador.
PLACA PCB	Baqelita de circuito impreso.

PLACA DE CIRCUITO

El diseño del circuito se fragmentó en dos secciones distintas: una dedicada exclusivamente al control del tono (pitch), y la otra encargada del manejo del volumen, la amplificación del prototipo y la salida de audio correspondiente (Figura 27).

Aquí se incorporan todos los parámetros y procesos desarrollados y descritos anteriormente, además de los valores de todos los elementos electrónicos a utilizar.

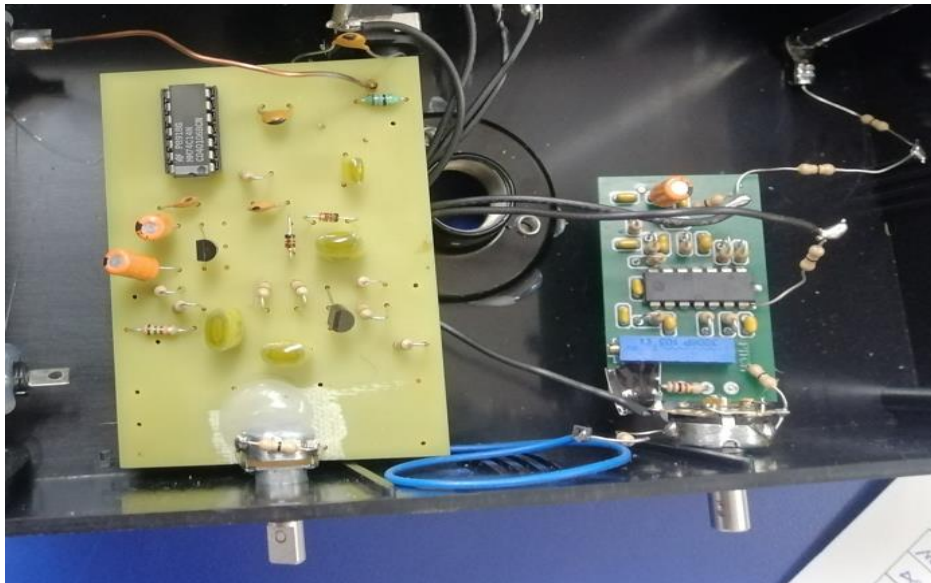


Figura 27: Placas del circuito electrónico del theremín.

DISEÑO DE CARCASA DE PROTOTIPO

Para el diseño del prototipo se basó en la forma clásica de un theremin del Dr. Robert Moog [5], como se puede observar en la Figura 28, si diseño es casi similar al de ETHEREWAVE. Este diseño fue realizado en SketchUp programa que permite visualizar diseños en 3D y con simetría.

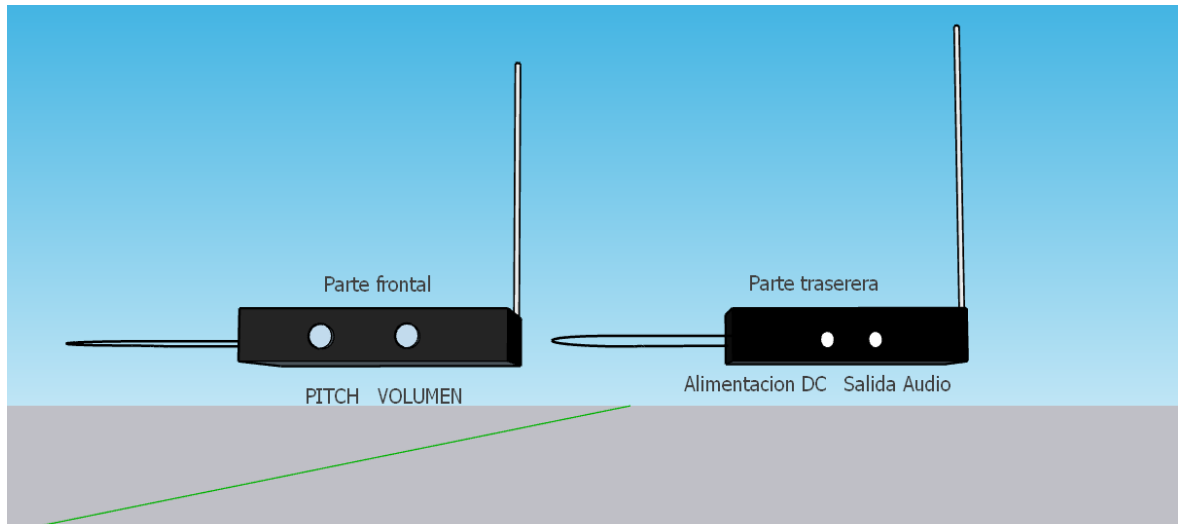


Figura 28: Diseño de carcasa del prototipo en SketchUp.

Para la implementación de la carcasa se seleccionó una caja de color negro de plástico, en la cual se realizaron las diferentes adaptaciones para los elementos electrónicos como potenciómetros, antenas, conectores de entrada y salida.

Tabla 11: Características del diseño de la carcasa del prototipo.

Ítem	Descripción
Diseño	Caja rectangular negra.
Tipo	Plástica.
Dimensiones	Largo – alto – ancho: 19 x 7 x 11 cm.
Parte frontal	Potenciómetro de Pitch y Volumen.
Parte trasera	Entrada voltaje DC, Salida de audio Jack 3.5mm.

Lado Izquierdo	Antena Bucle.
Parte superior	Antena vertical.

IMPLEMENTACION COMPLETA DEL PROTOTIPO

Terminado todos los procesos y diseños anteriormente mencionados, el prototipo final queda de la siguiente manera como se muestra en la Figura 29, listo para usarse.

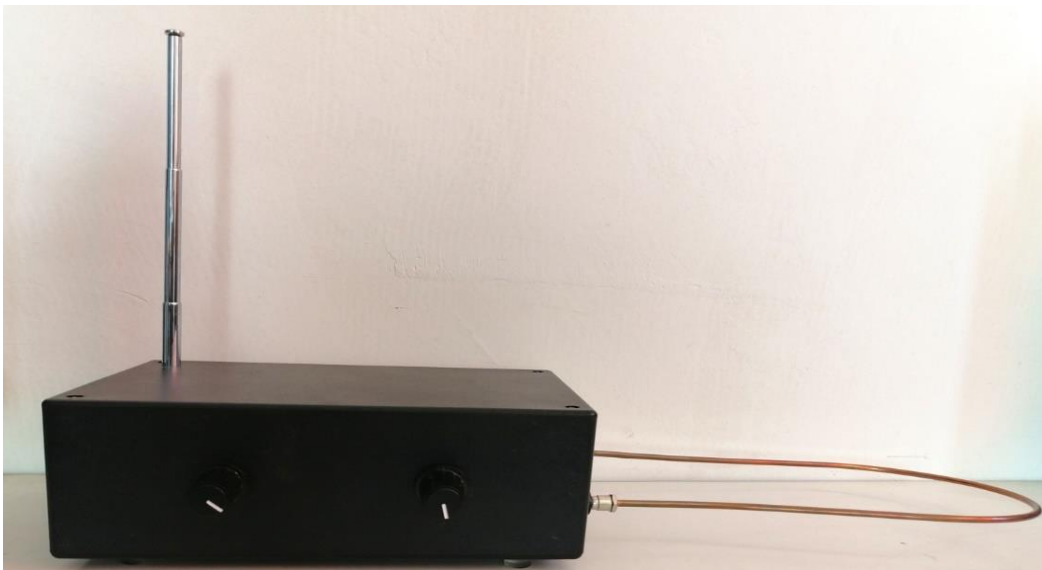


Figura 29: Prototipo final del theremín.

3.7.3 FASE III: FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO

En esta fase procedemos a realizar la evaluación y funcionamiento del prototipo en la música.

EVALUACION Y FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO

Análisis de Frecuencia

En este punto verificamos las frecuencias que nos genera el prototipo (Figura 30), para ello utilizamos un analizador de frecuencia, para que nos pueda mostrar la onda de oscilación además de los valores de frecuencia generados por el theremin, mediante esto verificamos que el prototipo este oscilando dentro del rango de frecuencias audibles al oído humano y que van acorde a las notas musicales.



Figura 30: Análisis de frecuencias generadas por el prototipo.

Afinación

En esta parte verificamos que el prototipo genere el tono adecuado o requerido, para ello utilizamos 2 afinadores uno dentro del programa REAPER programa de producción musical, y un afinador cromático que es utilizado para afinar instrumentos Figura 31.

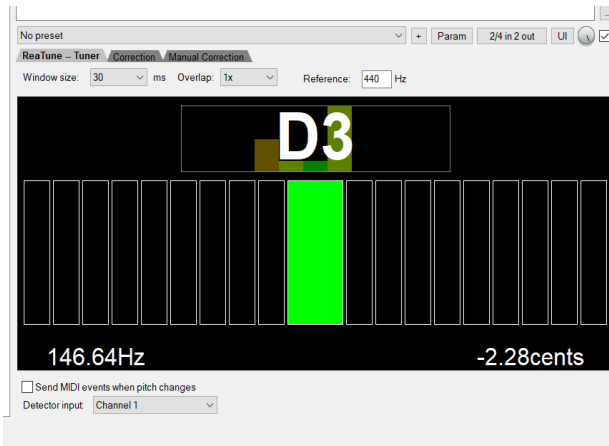


Figura 31: Afinador del programa REAPER, Afinador Cromático clásico.

Sonido

En este punto verificamos que el sonido del prototipo conectado a un amplificador de audio sea limpio y sin ruido garantizando así una calidad de audio nítida del instrumento sin afectación a la calidad de sonido como observamos en la Figura 32.



Figura 32: Conexión de altavoces al prototipo y sonido.

CREACION DE LINEAS MELODICAS

En esta parte realizamos la grabación de líneas melódicas en un espacio controlado como por ejemplo un estudio de grabación (Figura 33) en el cual conectamos el prototipo a una interfaz de audio para poder grabar directamente la salida de audio.



Figura 33 Creación de línea melódica.



Figura 34 Espectro de línea melódica.

4. CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 LINEA MELODICA 1 – MUSICA CLASICA

PRUEBA DE NORMALIDAD

Hipótesis nula H_0

Los datos de las frecuencias generadas por el piano y el prototipo para la música clásica corresponden a una distribución normal.

Hipótesis Alternativa H_1

Los datos de las frecuencias generadas por el piano y el prototipo para la música clásica no corresponden a una distribución normal.

En vista que la base de datos tiene una cantidad mayor de 50 mediciones, se aplica la prueba de Normalidad de Kolmogórov-Smirnov. En la Tabla 12 se puede observar que el P-valor es menor a 0.05, por lo cual es necesario realizar una prueba de hipótesis no paramétrica ya que la distribución no es normal.

Tabla 12: Prueba de Normalidad-frecuencia y tipo de instrumento.

Pruebas de normalidad							
	Tipo de instrumento	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Frecuencia	THEREMIN	,168	55	<,001	,883	55	<,001
	PIANO	,168	55	<,001	,883	55	<,001
a. Corrección de significación de Lilliefors							

HIPOTESIS

Las hipótesis planteadas son:

Hipótesis Nula H_0 : La distribución de frecuencias del prototipo es igual a la distribución de frecuencias del instrumento (PIANO).

Hipótesis Alternativa H_1 : La distribución de frecuencias del prototipo es diferente a la distribución de frecuencias del instrumento (PIANO).

PRUEBA NO PARAMETRICA

Para el análisis no paramétrico se realizó la prueba de hipótesis de U de Mann-Whitney la cual permite determinar si hay diferencia significativa de las distribuciones de frecuencia en la línea melódica de la música clásica. Como se puede observar en la Tabla 13, el valor de significancia es 0.995, por lo tanto, se acepta la hipótesis nula; esto quiere decir que no existe una diferencia entre las distribuciones de frecuencias del prototipo con las del Piano.

Tabla 13 : Prueba U de Mann-Whitney (Frecuencia-tipo instrumento).

N total	110
U de Mann-Whitney	1513,500
W de Wilcoxon	3053,500
Estadístico de prueba	1513,500
Error estándar	167,268
Estadístico de prueba estandarizado	,006
Sig. asintótica (prueba bilateral)	,995

DIAGRAMA DE CAJAS

En la Figura 35, se muestra la distribución de conjunto de datos en un diagrama de cajas, donde se puede apreciar los valores que las medianas, máximos y mínimos tanto del prototipo como del instrumento se comportan de manera similar.

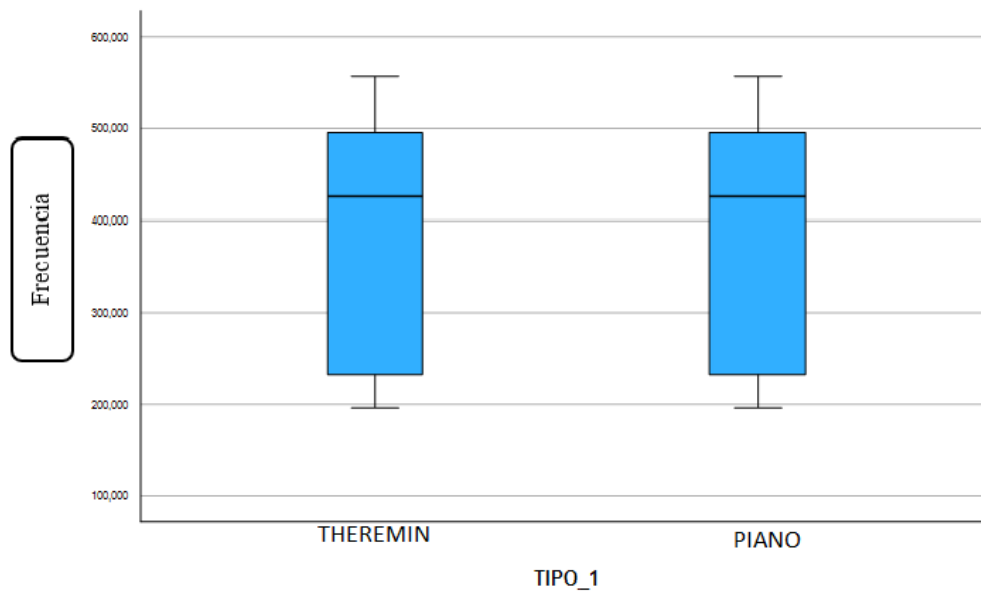


Figura 35 : Diagrama de cajas de las distribuciones de frecuencias respecto al Tipo de Instrumento

4.2 LINEA MELODICA 2 – MUSICA POPULAR

PRUEBA DE NORMALIDAD

Hipótesis nula H_0

Los datos de las frecuencias generadas por el Sintetizador y el prototipo para la música popular corresponden a una distribución normal.

Hipótesis Alternativa H_1

Los datos de las frecuencias generadas por el Sintetizador y el prototipo para la música popular no corresponden a una distribución normal.

En vista que la base de datos tiene una cantidad mayor de 50 datos, se aplica la prueba de Normalidad de Kolmogórov-Smirnov. En la Tabla 15 se puede observar que el P-valor es menor a 0.05, por lo cual es necesario realizar una prueba de hipótesis no paramétrica ya que la distribución no es normal.

Tabla 14: Prueba de Normalidad Frecuencia y tipo de instrumento.

Pruebas de normalidad							
	Tipo de instrumento	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Frecuencia	Theremín	,152	72	<,001	,885	72	<,001
	Sintetizador	,152	72	<,001	,885	72	<,001
a. Corrección de significación de Lilliefors							

HIPOTESIS

Las hipótesis planteadas son:

Hipótesis Nula Ho: La distribución de frecuencias del prototipo es igual a la distribución de frecuencias del instrumento (SINTETIZADOR).

Hipótesis Alternativa H1: La distribución de frecuencias del prototipo es diferente a la distribución de frecuencias del instrumento (SINTETIZADOR).

PRUEBA NO PARAMETRICA

Para el análisis no paramétrico se realizó la prueba de hipótesis de U de Mann-Whitney la cual permite determinar si hay diferencia significativa de las distribuciones de frecuencia en la línea melódica de la música clásica. Como se puede observar en la Tabla 16, el valor de

significancia es 0.987, por lo tanto, se acepta la hipótesis nula; esto quiere decir que no existe una diferencia entre las distribuciones de frecuencias del prototipo con las del Sintetizador.

Tabla 15 : Prueba U de Mann-Whitney (Frecuencia y tipo de instrumento).

N total	144
U de Mann-Whitney	2596,000
W de Wilcoxon	5224,000
Estadístico de prueba	2596,000
Error estándar	250,272
Estadístico de prueba estandarizado	,016
Sig. asintótica (prueba bilateral)	,987

DIAGRAMA DE CAJAS

En la Figura 36, se muestra la distribución de conjunto de datos en un diagrama de cajas, donde se puede apreciar los valores que las medianas, máximos y mínimos tanto del prototipo como del instrumento se comportan de manera similar.

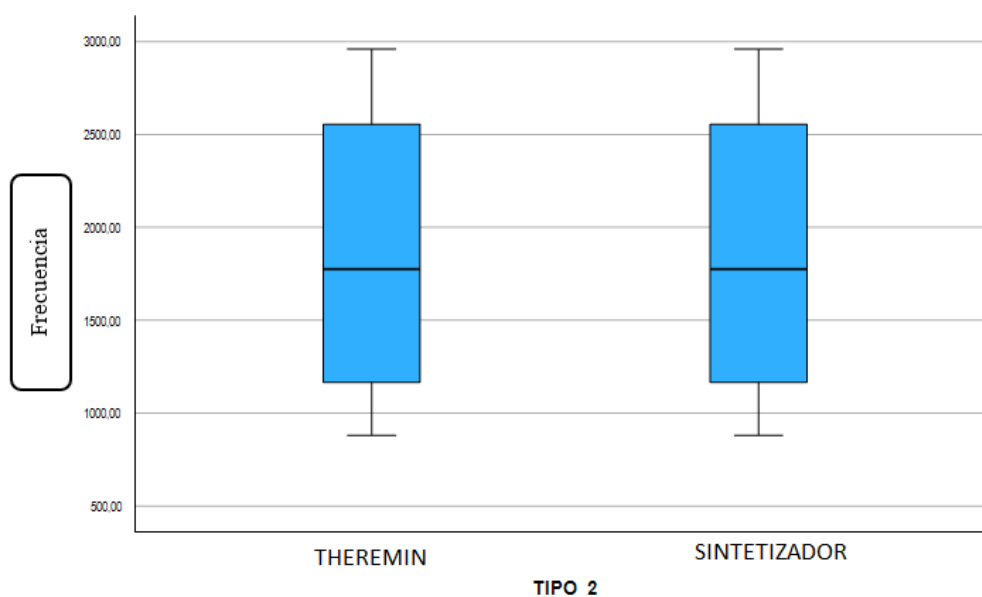


Figura 37 : Diagrama de cajas de las distribuciones de frecuencias respecto al Tipo de Instrumento.

5. CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

Tras realizar un estudio bibliográfico de la funcionalidad y electrónica de un instrumento theremín y los circuitos oscilantes, se logró adquirir un conocimiento relacionado a los aspectos de resonancia, capacitancia y osciladores relevantes en el diseño e implementación del prototipo de instrumento theremín.

Se ha logrado con éxito la implementación de un instrumento theremín electrónico que sirve para la creación de música clásica y popular, que puede ser utilizado también para el cine y teatro gracias a los efectos sonoros que este genera.

Para evaluar el funcionamiento del dispositivo se generaron 2 líneas melódicas diferentes y se compararon con 2 instrumentos musicales un piano y un sintetizador. Tras aplicar una prueba no paramétrica se pudo determinar que las distribuciones de frecuencia del dispositivo implementado y de los instrumentos musicales son iguales, es decir que se comportan de la misma forma al generar música clásica y popular.

5.2 RECOMENDACIONES

Se recomienda continuar con la investigación y el desarrollo en el campo de la tecnología y el arte de este instrumento de theremín, mejorando el diseño de las antenas para que permitan tener un control más adecuado del prototipo, además utilizar circuitos integrados que sean resistentes al ruido y a la electrostática para generar un sonido claro y limpio. Se recomienda, además, experimentar con nuevos géneros o tipos de música, por ejemplo; la música electrónica, música ambiente, entre otras para generar nuevas experiencias sonoras de la música en general.

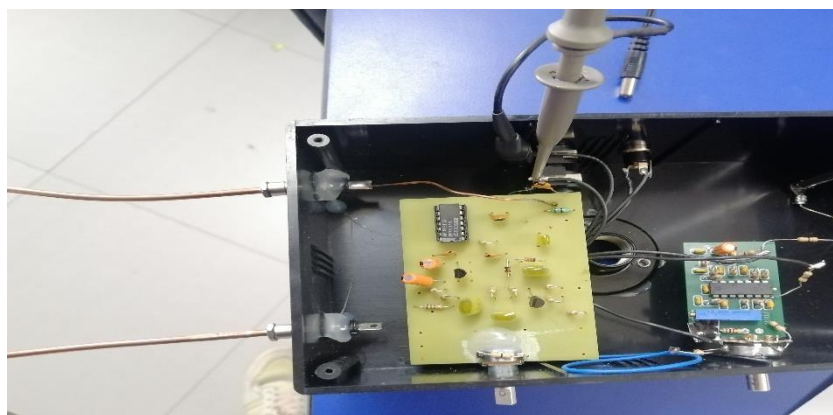
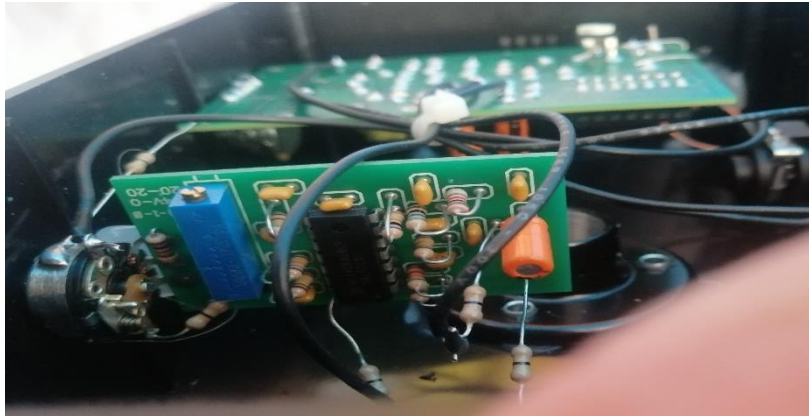
BIBLIOGRAFÍA

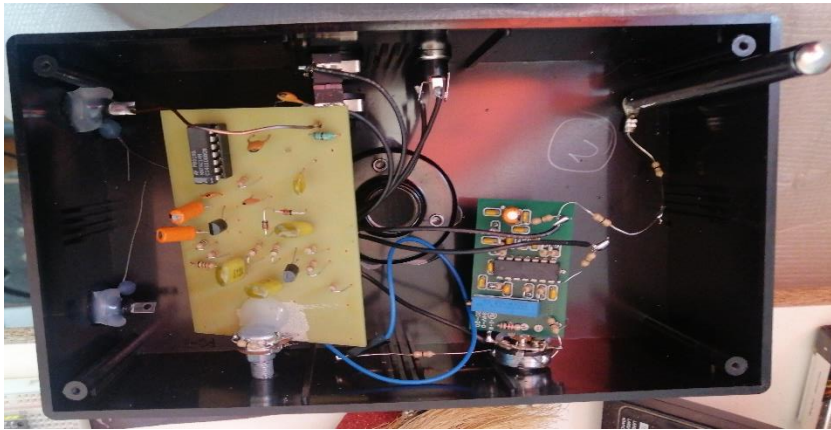
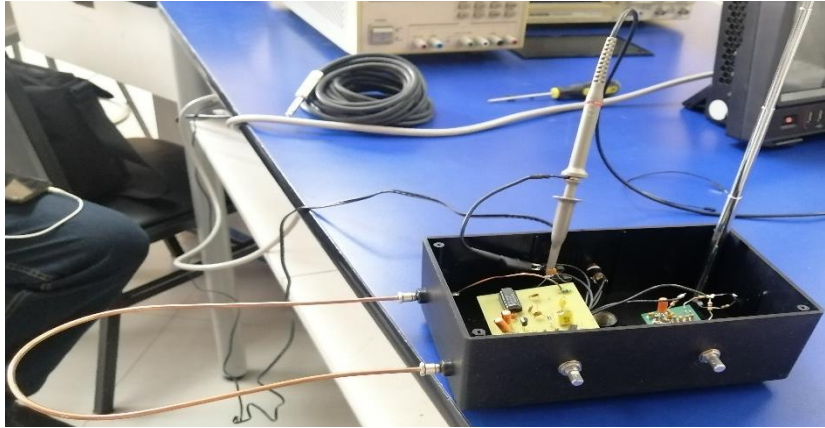
- [1] M. Jenkins, Analog Synthesizers, Focal Press, 2007.
- [2] D. Crombie, The Complete Synthesizer, A. Comprehensive Guide, 1984.
- [3] M. Blog, Que es un theremin y como funciona, Edward Bond, 2021.
- [4] N. Miller, Es este el instrumento musical más extraño jamás inventado, BBC NEW MUNDO, 2021.
- [5] M. R. A, Understanding, customizing and hot-rodding your Etherwave theremi, Moog Music Inc, 2003.
- [6] Victor, RCA Theremin Service Notes, Radio-Victor Corporation of America, 1929.
- [7] N. Holonyak Jr., Theremin oscillators and oscillations., American Journal of Physics, 1999.
- [8] V. Dávila, Diseño e Implementación de un Órgano Musical Electrónico con Theremin., Peru: UNMSM, 2013.
- [9] J. Balias, Cómo diseñar un buen theremin., Theremin Hispano., 2008.
- [10] A. Glinsky, ether music and espionage, 2000.
- [11] Z. & M. P. Calle, Corriente Alterna - Oscilaciones electromagnéticas., Peru: Universidad Nacional de Educación., 2021.
- [12] F. D. C. P. A. & M. R. Sandoval, Investigación, Fundamentos y metodología., Pearson, 2007.
- [13] F. Arias, El proyecto de investigación, Caracas: EPISTEME, 2006.
- [14] G. P. V. A. A. E. & C. M. Guevara Alban, Metodologías de investigación educativa descriptivas, experimentales, participativas, y de investigación, acción, Recimundo, 2020.
- [15] A. Glinsky, Theremin Ether Music and Espionage, University of Illinois, 2005.
- [16] S. Torres, Comunicacion y Cultura, 2014.
- [17] J. O, CULTURA DE INNOVACIÓN EN LOS DEPARTAMENTOS DE INVESTIGACION DE LOS INSTITUTOS UNIVERSITARIOS DE TECNOLOGÍA DE LA REGIÓN ANDINA, Maracaibo: URBE, 2013.
- [18] A. B. S., Formulas para el calculo de la muestra en investigaciones, mexico, 2005.
- [19] P. Wheeler, Musical instrument technology of the 20th century. The Journal of the Acoustical Society of America, 2004.
- [20] K. Skeldon, L. Reid, V. McNally y C. Dougan B. and Fulton, Physics of the Theremin, 1998.

- [21] R. M. Schafer, Revista ECOS ISSN 2697-2913 Año 2 N° 2, ECOS, 2021.
- [22] A. Barrojas, Formulas para el calculo de muestras en investigaciones.
- [23] T. Holmes, *Electronic and Experimental Music: Pioneers in Technology and Composition*, 2002.
- [24] A. Glinsky, «The Theremin in the Development of Electronic Music.,» *Journal of the American Musicological Society*, 2012.
- [25] N. M. A. & R. J. Collins, *Live coding the emergent musicality of the theremin, Organised Sound*, 2007.
- [26] R. M. Hand, *Exploring the Theremin as a Hands-On Tool for Teaching Basic Electronics and Antennas*, *IEEE Transactions on Education*, 2015.
- [27] A. & W. M. M. Ferragine, « Mapping the Theremin: An Examination of the Mapping Strategies Used in the Performance of an Iconic Electronic Instrument,» de *In Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression* , 2019.
- [28] e. a. Olivia Mattis, «Theremin Sensors for Gesture Recognition: A Comparative Review,» *IEE Sensors Journal*, vol. 18, n° 12, 2018.
- [29] L. Friedrichs, «A Low-Cost Theremin Device Using Capacitance Sensing,» *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 12, n° 66, 2011.
- [30] D. Ferris, *Music and Sound in Documentary Film*, Routledge, 2010.

ANEXOS

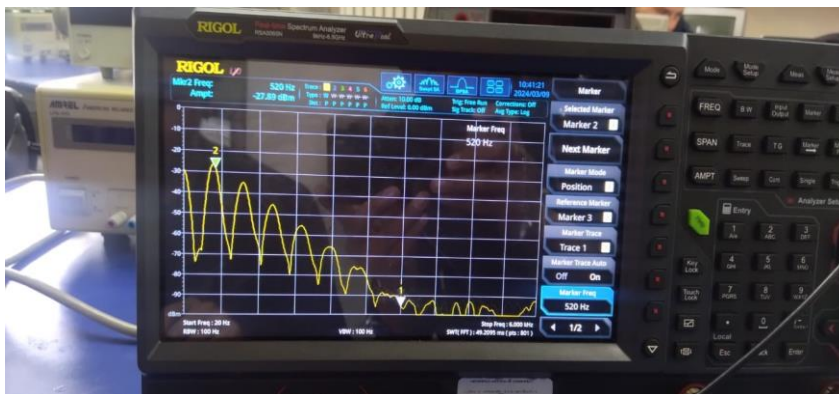
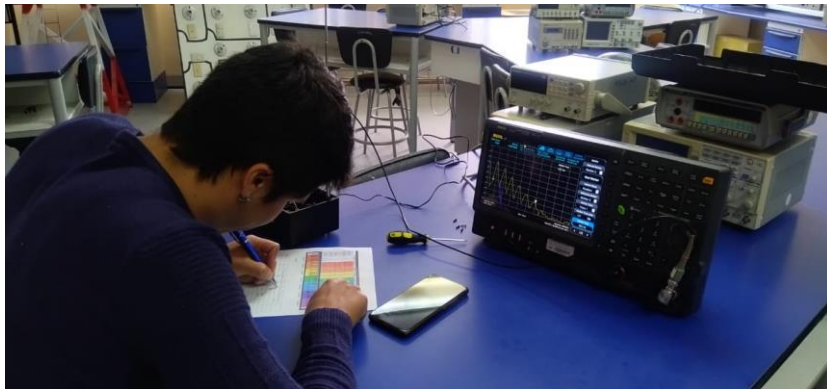
Implementación



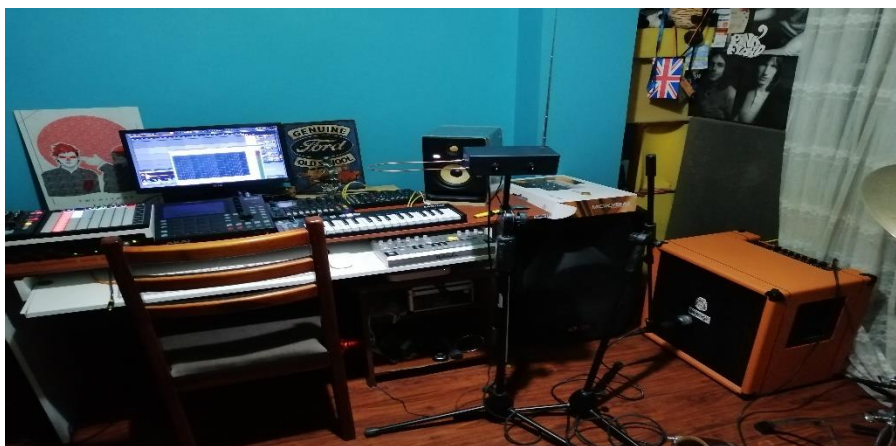


Análisis de frecuencia



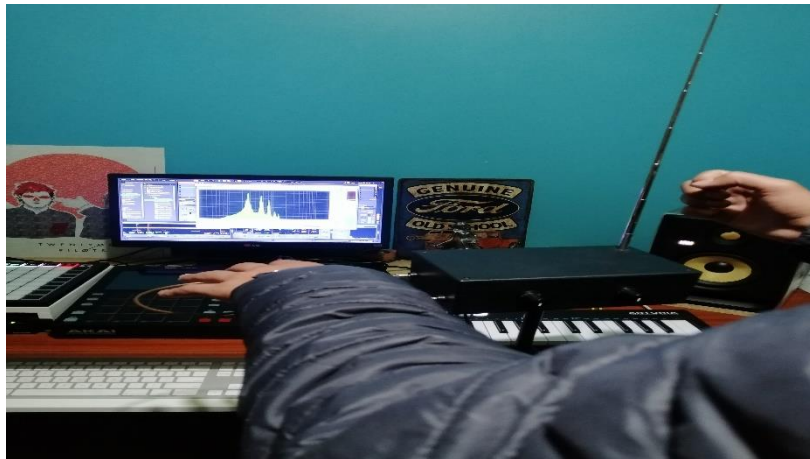


Calidad de sonido





Líneas melódicas





Grabación de audio en estudio musical



