

INSTRUMENTO MUSICAL VIRTUAL DE TEMPERADO DINÁMICO IMVTD

Versión 1.0

Diseño de Software

Por: Oscar Alejandro Cardoso Guzmán
soundgraphic@gmail.com

Maestría en Artes Digitales - ITM
Medellín

Contenido

1. FICHA TÉCNICA DEL PROYECTO	4
2. CONTEXTUALIZACIÓN	4
3. MOTIVACIÓN Y PROPÓSITO	9
4. CONCEPTOS DE DISEÑO.....	9
5. DISEÑO DE DETALLE	14
7. TEMPERADO DINÁMICO.....	16
8. INTERFAZ DE USUARIO	19
9. REFERENCIAS	21

Lista de Tablas

Tabla 1. Intervalos de quinta justa.....	6
Tabla 2. Necesidades de diseño.....	9
Tabla 3. Conceptos de diseño.....	9
Tabla 4. Funciones de software.....	14
Tabla 5. Actividades para función de modificación del temperado.....	16
Tabla 6. Temperados musicales elegidos para IMVTD.....	16
Tabla 7. Caracterización de las personas que realizaron la encuesta auditiva.....	17
Tabla 8. Intervalos de menor batimiento en función de su temperado.....	17
Tabla 9. Acordes con mayor consonancia acústica.....	17
Tabla 10. Caracterización de los posibles usuarios.....	19

Lista de Ecuaciones

Ecuación 1. Intervalo de octava musical.....	6
Ecuación 2. Inconsistencia en el Temperado Pitagórico.....	7
Ecuación 3. Cálculo de intervalos en Temperamento Igual.....	7
Ecuación 4. Cálculo de frecuencia para La ₄ equitemperada.....	7

Lista de Ilustraciones

Ilustración 1. Fenómeno de batimiento, por Ansgar Hellwig.....	5
Ilustración 2. Monocordio básico, por Gerardo Rosa.....	6
Ilustración 3. Teclado isomórfico, por Plamondon, Milne & Sethares.....	8
Ilustración 4. Matriz de necesidades de diseño.....	10
Ilustración 5. Diagrama funcional.....	10
Ilustración 6. Concepto de solución a partir del diagrama funcional.....	11
Ilustración 7. Matriz de ponderación problema 1.....	12
Ilustración 8. Matriz de ponderación problema 2.....	12
Ilustración 9. Matriz de ponderación problema 3.....	13
Ilustración 10. Resultado elementos para la solución de problemas.....	13
Ilustración 11. Diagrama arquitectura del sistema.....	14
Ilustración 12. Diagrama de diseño de software.....	15
Ilustración 13. Diagrama algoritmo de temperado dinámico.....	18
Ilustración 14. Necesidades para diseño de interacción.....	19
Ilustración 15. Interfaz de Usuario.....	20
Ilustración 16. Información para el usuario.....	20

1. FICHA TÉCNICA DEL PROYECTO

TÍTULO	Instrumento Musical Virtual de Temperado Dinámico
TIPO DE PROYECTO	Investigación
MODALIDAD	Producto derivado de actividades de desarrollo tecnológico e innovación
TIPO DE PRODUCTO	Diseño de Software
CERTIFICADO DE REGISTRO	No. 1-2018-22460 (Dirección Nacional de Derecho de Autor)
PROGRAMA ACADÉMICO	Maestría en Artes Digitales
ESTUDIANTE	Oscar Alejandro Cardoso Guzmán
ASESOR	MA. Jorge Mario Valencia Upegui

2. CONTEXTUALIZACIÓN

El temperado o temperamento en la música, es la distancia o proporción que existe entre las notas de una escala. Esto hace que diferentes temperados, empleen distintas frecuencias para definir una misma tonalidad.

Es posible rastrear el concepto de temperado hasta los orígenes de la música polifónica en la antigua Grecia. Debido a su importancia en la afinación y composición, fue ampliamente explorado por la escuela de los pitagóricos, quienes lo concibieron como una técnica para construir una escala cromática utilizando proporciones de frecuencias entre sus intervalos.

Durante la Edad Media, la disparidad en la afinación suponía inconsistencias en la interpretación de ciertos intervalos, principalmente en instrumentos de registro tonal amplio, sumado a algunos problemas con los ensambles instrumentales y la transposición musical. Fue sólo hasta mediados del siglo XVI que se propone como solución el Temperado Igual, el cual distribuye proporcionalmente las frecuencias de acuerdo con la altura de cada intervalo (comportamiento exponencial respecto a la frecuencia). El Temperamento Igual se estandarizó en la música occidental a partir del siglo XVIII, cuando fue acogido por una gran cantidad de compositores de la época, convirtiéndose en el sistema que predomina en la actualidad.

Variaciones de temperado durante la afinación generarán cantidades de frecuencias menores o mayores entre las tonalidades de la escala, ocasionando por ejemplo que una misma pieza interpretada con dos temperados diferentes, produzca sensaciones disímiles o incluso opuestas: la afinación de un instrumento musical no sólo dependerá de la frecuencia de referencia que se emplee para su ejecución, sino también de la proporción de frecuencias que se disponga entre sus intervalos, por esta razón, la forma de temperado modificará la consonancia o disonancia que se pueda percibir al escuchar un intervalo, triada o acorde.

Previo a la técnica de Temperado Igual, en donde los semitonos de la escala mantienen siempre la misma proporción, se emplearon incontables formas históricas de temperamento musical. El temperado constituía una variable de suma importancia durante la composición e interpretación de una pieza, obligando incluso al compositor a omitir ciertos acordes debido a las disonancias que éstos producían bajo formas de temperar particulares.

Surgen los siguientes interrogantes: Si desde niños nuestros oídos han sido expuestos a las mismas formas de temperar la música ¿estaremos ya condicionados a escuchar bajo estos estándares y nos estaremos perdiendo los matices y las sensaciones que produce música no equitemperada como la de Oriente?, ¿es posible concebir alguna metodología que permita explorar diferentes formas de temperado manteniendo cierto grado de compatibilidad con nuestra manera de percibir la música?

Consonancia, Disonancia y Batimiento:

La música posee una gran cantidad de descriptores conceptuales que se utilizan para caracterizar las sensaciones generadas en el ser humano a partir del estímulo sonoro. En la armonía, por ejemplo, que se encarga de estudiar todo lo relacionado con los sonidos que se producen de manera simultánea, existen los conceptos de consonancia y disonancia, relacionados con la sensación de agrado o rechazo por parte del oído respecto a dos o más tonos interpretados al unísono (Pérez & Fraile, 2006).

Tradicionalmente, los intervalos considerados como consonantes han sido: tercera menor, tercera mayor, cuarta justa, quinta justa, sexta menor, sexta mayor y octava justa. Mientras que, entre los considerados disonantes han estado: segunda menor, segunda mayor, quinta disminuida y séptima menor. Sin embargo, la valoración subjetiva de la consonancia o disonancia de un intervalo puede cambiar dependiendo de su contexto espaciotemporal y del sujeto de prueba (Sel & Calvo-Merino, 2013).

El batimiento acústico es un factor que puede incidir en la percepción de la consonancia o disonancia, ya que se presenta entre dos señales, idealmente tonos puros, cuando sus frecuencias tienen valores diferentes. Consiste en un proceso de modulación producido por la suma de señales, donde la amplitud de la señal resultante varía de manera periódica, disminuyendo de velocidad a medida que la diferencia entre las frecuencias de base se reduce, o aumentando de velocidad en el caso contrario. La detección de batimientos es la técnica más empleada en la actualidad para afinación de instrumentos musicales (Carrión, 2010).

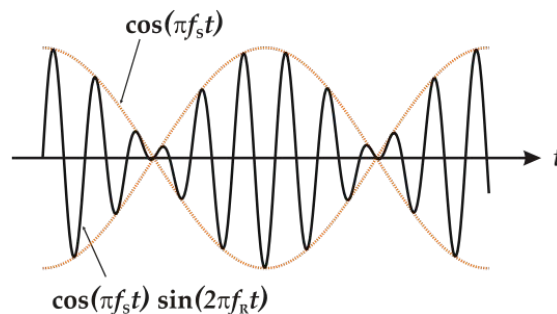


Ilustración 1. Fenómeno de batimiento, por Ansgar Hellwig

Afinación en la música de Occidente:

El concepto de intervalo en la música se refiere a la relación entre las frecuencias de dos tonos. Puede ser expresado como el cociente de dichas frecuencias, en donde la de mayor valor corresponderá al numerador y la de menor valor al denominador. Como ejemplo, el intervalo entre las notas La_4 (440 Hz.) y La_5 (880 Hz.) se expresará de la siguiente forma:

$$\text{Intervalo} = \frac{f_s}{f_i} = \frac{880 \text{ Hz}}{440 \text{ Hz}} = \frac{2}{1}$$

Ecuación 1. Intervalo de octava musical

Cuando varios tonos se ejecuten de manera simultánea, se conformará un acorde, que podrá ser valorado subjetivamente como consonante o disonante en función de la sensación auditiva que se experimente. Dicha sensación dependerá de la relación entre los intervalos del acorde y de su nivel de batimiento (Del Río, 2012).

La escala musical occidental encuentra sus inicios en Pitágoras y la escuela de los pitagóricos, quienes calcularon las relaciones entre los intervalos musicales a partir de la Matemática y la Geometría, para validarlos posteriormente en instrumentos de cuerda como el monocordio (Martin, 2008). Los experimentos desarrollados por los pitagóricos consistieron en tensar los extremos de una cuerda sobre dos soportes, para luego generar tensión adicional con una cuña que se disponía en puntos intermedios. Se lograba segmentar la cuerda de varias maneras, generando tonos más agudos que el original. Como ejemplo, los intervalos de cuarta, quinta y octava justas se lograron a partir de longitudes de cuerda equivalentes a $3/4$, $2/3$ y $1/2$, respectivamente (Arenzana & Arenzana, 1998).

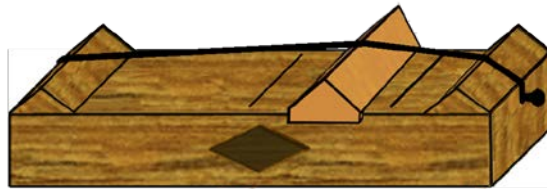


Ilustración 2. Monocordio básico, por Gerardo Rosa

Los pitagóricos construyeron una escala a partir de relaciones de quintas, es decir $2/3$ de la longitud de una cuerda o $3/2$ en relación con la frecuencia (Pabón, 2010). Por ejemplo, si multiplicáramos la fracción $3/2$ por las frecuencias correspondientes a las notas de la parte superior siguiente tabla, obtendríamos la frecuencia correspondiente a las notas de la parte inferior:

Tono Base	Do ₁	Sol ₁	Re ₂	La ₂	Mi ₃	Fa# ₄	Do# ₅
5° Grado	Sol ₁	Re ₂	La ₂	Mi ₃	Fa# ₄	Do# ₅	Sol# ₅

Tabla 1. Intervalos de quinta justa

El inconveniente con la escala pitagórica radica en que, a partir de cierto número de intervalos de quinta, se obtiene una diferencia respecto a los intervalos de octava, lo cual supone una inconsistencia del sistema de afinación: Doce intervalos de quinta deberían equivaler a siete intervalos de octava, pero no es así:

$$\left(\frac{3}{2}\right)^{12} \neq 2^7$$

$$129,746 \neq 128$$

Ecuación 2. Inconsistencia en el Temperado Pitagórico

Esta pequeña desafinación, conocida como *coma pitagórica* (Beltrán, 2013), hace que la escala presente ciertos inconvenientes, por ejemplo, durante la interpretación de instrumentos de rango tonal extendido, ya que habrá que reducir la cantidad de frecuencias contenidas en una de sus quintas para hacerla coincidir con la razón de octava, procedimiento que genera un intervalo altamente disonante denominado quinta del lobo.

La escala Temperada Igual o Equitemperada, surge en el siglo XVI como una forma de solucionar el inconveniente de las *comas* en los temperados que la precedieron; se basa en el cromatismo pitagórico, pero reparte el error de la coma a través de todos sus intervalos, por lo cual el único intervalo que podrá considerarse realmente puro será el de octava (Redondo, 2008). Cada intervalo equitemperado posee la misma proporción de frecuencias (100 centésimas por semitono), calculable a partir de la siguiente expresión:

$$f_s = f_0 * \left(\sqrt[12]{2}\right)^n$$

Ecuación 3. Cálculo de intervalos en Temperamento Igual

f_s , representa la frecuencia del tono a calcular

f_0 , es la frecuencia de referencia

n , equivale a la cantidad de semitonos a partir de la frecuencia de referencia

Como ejemplo, para calcular la frecuencia de la octava a partir de la nota La_3 , deberá tomarse en cuenta su frecuencia (220 Hz) y los 12 semitonos necesarios para llegar a la octava superior (La_4):

$$f_s = 220 \text{ Hz} * \left(\sqrt[12]{2}\right)^{12} = 220 \text{ Hz} * 2 = 440 \text{ Hz}$$

Ecuación 4. Cálculo de frecuencia para La_4 equitemperada

Pese a que el Temperado Igual parece solucionar el problema de la afinación al dividir la octava en 12 semitonos iguales (metodología que se aplica ampliamente en la música occidental desde el siglo XVIII), genera un problema mayor ya que todos los intervalos diferentes al de octava producen batimiento, fenómeno fácilmente perceptible en los intervalos de cuarta justa y quinta justa cuando se compara con el Temperado Pitagórico (Duffin, 2008).

Tonalidad dinámica:

La tonalidad dinámica es un concepto muy reciente (primera década del siglo XXI), que surge en la música micro tonal como una forma de experimentar cambios en la afinación y el timbre de un instrumento. Para esto, puede emplearse un teclado isomórfico, que consiste en un controlador de entrada con teclas distribuidas de una manera específica, en el cual pueden ejecutarse melodías y transponerlas sin necesidad de cambiar los patrones de digitación. Dicho teclado se comunica con un software que se encarga de realizar el procesamiento de datos y sintetizar los sonidos. Se combinan técnicas de afinación y reconstrucción tímbrica que pueden ajustarse a través del tiempo para producir efectos como: curvas de afinación polifónica, afinación progresiva y la modulación del temperamento (Plamondon, Milne & Sethares, 2009).

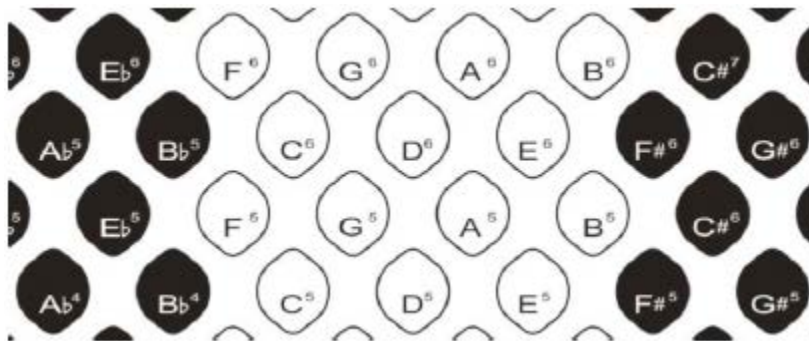


Ilustración 3. Teclado isomórfico, por Plamondon, Milne & Sethares

Solución al problema del temperado:

En el marco del desarrollo del presente proyecto, surgió la propuesta del *Temperado Dinámico* como solución alternativa para mitigar el fenómeno de batimiento acústico presente en el Temperamento Igual e invariante en el tiempo.

Se tomó como punto de partida la idea de que era posible encontrar, a partir del análisis de diversos temperados históricos, proporciones de frecuencias entre intervalos musicales que produjeran menores batimientos que los generados por el Temperamento Igual. La intención fue la de aplicar dichas proporciones para la afinación de un instrumento musical virtual con controlador a manera de teclado que, dependiendo de los intervalos, triadas y acordes ejecutados por intérprete, reprodujera sonidos temperados dinámicamente buscando la mayor consonancia acústica, con el menor batimiento posible. Se asumió que la búsqueda de un “temperamento musical ideal”, al menos en el sentido armónico, no logró llegar a buen término en los estudios que se desarrollaron hasta el siglo XVIII debido a las limitaciones de la invariabilidad en el tiempo. Se propuso entonces aprovechar los recursos de procesamiento existentes en la era digital para concebir un sistema que adaptara su salida dinámicamente de acuerdo con la información de entrada.

Se diseñó un software que recibe datos *MIDI* provenientes de controladores musicales digitales, detecta patrones de interpretación, modifica la forma de temperado de las notas en tiempo real y permite reproducirlas a través de un sintetizador de audio.

3. MOTIVACIÓN Y PROPÓSITO

El proyecto Instrumento Musical Virtual de Temperado Dinámico (IMVTD), surgió de la necesidad por desarrollar una nueva metodología de afinación de instrumentos musicales digitales que mitigara el fenómeno de batimiento acústico entre intervalos y acordes, mejorando así la consonancia en la música.

El software IMVTD se diseñó con la intención de generar una herramienta que permita a su usuario explorar modelos de afinación diferentes a los estandarizados, facilitándole percibir las variaciones acústicas que los temperados producen en las piezas musicales, ofreciéndole la opción de modificarlos manualmente en tiempo real o de que el sistema lo haga de forma automática dependiendo de los patrones de interpretación del instrumento.

4. CONCEPTOS DE DISEÑO

Con el propósito de determinar los aspectos a tener en cuenta para el diseño de software, se realizó una encuesta dirigida a potenciales usuarios, a partir de la cual se detectaron las siguientes necesidades:

NECESIDADES	Integración con múltiples instrumentos musicales digitales
	Compatibilidad con sistemas operativos Windows y Mac
	Posibilidad de utilizar el software de manera independiente o asociado a sistemas DAW
	Facilidad de manejo
	Posibilidad de control vía Hardware
	Modo de ingreso de nuevos temperados
	Posibilidad de grabar lo que se “toca” en el instrumento musical

Tabla 2. Necesidades de diseño

Se propuso un listado de conceptos que podrían dar solución a las necesidades planteadas por los usuarios y se estableció una métrica de respuesta binaria (sí/no) para determinar la importancia de cada uno de ellos:

CONCEPTOS DE DISEÑO	Recepción y envío de datos musicales
	Instalador Multiplataforma
	Interfaz en versiones Stand-Alone, VST, y AAX
	Menú para cambio de temperado
	Control de temperado vía Hardware
	Edición de temperados
	Secuenciador de Eventos

Tabla 3. Conceptos de diseño

Se propuso un primer concepto de solución en donde el software se presentaba como el centro de procesamiento del sistema y se establecía el flujo de señal desde un controlador musical hasta un sistema de altavoces para la reproducción del sonido:

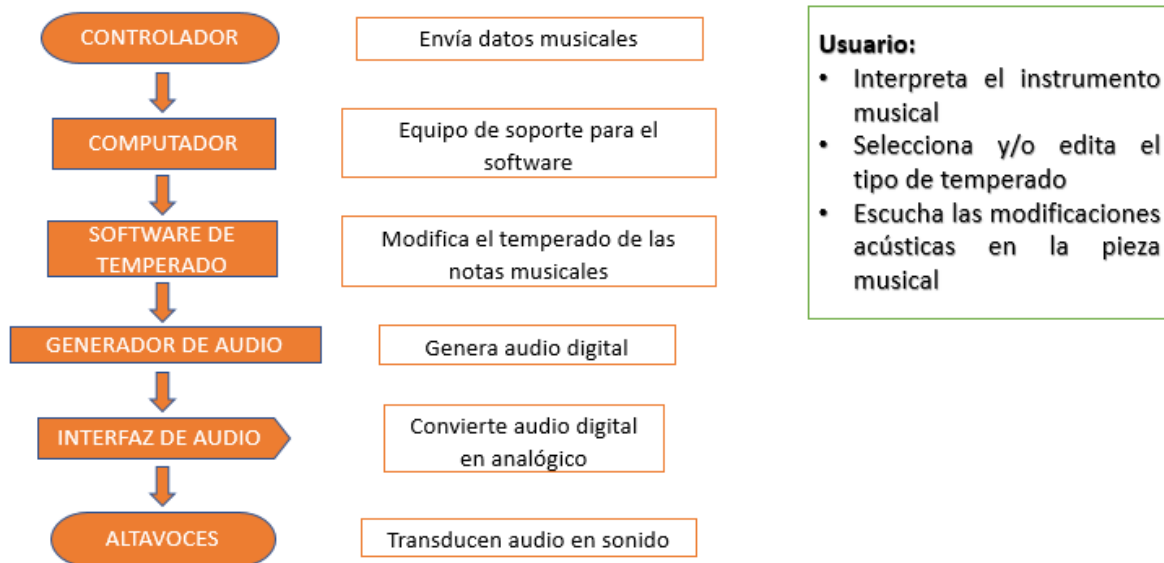


Ilustración 6. Concepto de solución a partir del diagrama funcional

A partir del primer concepto de solución, se identificaron tres problemáticas relacionadas con el desarrollo del software:

1. ¿Cómo Capturar datos de interpretación musical desde una variedad de instrumentos musicales digitales?
2. ¿Cómo generar compatibilidad para sistemas operativos Mac y Windows, utilizando el software de manera independiente o asociado a un sistema DAW?
3. ¿Cómo convertir los datos musicales en audio?

Se procedió a plantear la respuesta a cada problemática mediante diferentes elementos y criterios de solución. El elemento específico en cada caso se definió a partir de un ejercicio de ponderación, donde se calificaba de la siguiente forma: valor de uno (1) al elemento que cumplía con el criterio de solución, valor de cero (0) al elemento que cumplía parcialmente con el criterio y valor de menos uno (-1) al elemento que no cumplía con dicho criterio:

Sub Problema	Solución Propuesta	Elemento	Criterios
1. Capturar datos de interpretación musical a partir de una variedad de instrumentos digitales	Implementar un protocolo de comunicación estandarizado	<ul style="list-style-type: none"> Musical Instrument Digital Interface (MIDI) Open Sound Control (OSC) Control por voltaje (VC) 	<ul style="list-style-type: none"> Recepción y envío de datos en tiempo real Estabilidad Facilidad de implementación Conectividad Consumo de energía Versatilidad Integración con múltiples instrumentos musicales digitales

Elementos	MIDI	OSC	VC
Recepción y envío de datos en tiempo real	1	1	1
Integración con múltiples instrumentos musicales digitales	1	0	-1
Facilidad de implementación	1	1	-1
Consumo de energía	1	1	1
Estabilidad	1	1	0
Conectividad	1	1	0
Versatilidad	1	1	0
TOTAL	7	6	0

Ilustración 7. Matriz de ponderación problema 1

Sub Problema	Solución Propuesta	Elemento	Criterios
2. Generar compatibilidad con sistemas operativos Mac y Windows, para utilizar el software de manera independiente o asociado a sistemas DAW	Programar en una plataforma que asegure compatibilidad Mac/Win, para desarrollo de tecnologías stand-alone y plug-in	<ul style="list-style-type: none"> Max-MSP PureData NI Reaktor SuperCollider Huckleberry Juce 	<ul style="list-style-type: none"> Lenguaje de programación Compatibilidad con sistemas operativos Compatibilidad stand-alone y plug-in Facilidad de integración con sistemas DAW Soporte y recursos de ayuda para programación Precio Habilidades del programador

Elementos	Max-MSP	PureData	Reaktor	S.Collider	Juce
Lenguaje de programación	1	1	1	0	0
Compatibilidad con sistemas operativos	1	1	1	1	1
Compatibilidad stand-alone y plug-in	0	0	1	0	1
Facilidad de integración con sistemas DAW	1	0	1	0	1
Soporte y recursos de ayuda para programación	1	1	1	0	0
Precio	-1	1	-1	1	1
Habilidades del programador	0	0	1	-1	-1
TOTAL	3	4	5	1	3

Ilustración 8. Matriz de ponderación problema 2

Sub Problema	Solución Propuesta	Elemento	Criterios
3. Convertir los datos musicales en audio	Diseñar un software que permita convertir los datos que envía el instrumento musical digital en audio	<ul style="list-style-type: none"> Sintetizador de audio Sampler 	<ul style="list-style-type: none"> Protocolo de comunicación Baja latencia Capacidad para modificación de la tonalidad (micro-afinación) Exploración tímbrica Exploración de la envolvente acústica

Elementos	Sintetizador	Sampler
Protocolo de comunicación	1	1
Baja latencia	1	0
Capacidad para modificación de la tonalidad	1	0
Exploración tímbrica	1	1
Exploración de la envolvente acústica	1	0
TOTAL	5	2

Ilustración 9. Matriz de ponderación problema 3

Luego de establecer el elemento más indicado para dar solución a cada problemática, se determinó cuáles deberían ser los dispositivos de hardware asociados que soportaran su implementación:

RESULTADO MATRICES DE SELECCIÓN			
Sub Problemas	Solución	Elemento	Elementos Asociados
Capturar datos de interpretación musical a partir de una variedad de instrumentos digitales	Implementar un protocolo de comunicación estandarizado	Musical Instrument Digital Interface (MIDI)	Interfaz MIDI
Generar compatibilidad con sistemas operativos Mac y Windows, para utilizar el software de manera independiente o asociado a sistemas DAW	Programar en una plataforma que asegure compatibilidad Mac/Win, para desarrollo de tecnologías stand-alone y plug-in	Native Instruments Reaktor	Computador
Convertir los datos musicales en audio	Diseñar un software que permita convertir los datos que envía el instrumento musical digital en audio	Sintetizador de Audio	Interfaz de Audio y Altavoces

Ilustración 10. Resultado elementos para la solución de problemas

Con base en los elementos de solución y dispositivos asociados, se propuso la arquitectura del sistema, se definieron los subsistemas y se realizó el ajuste del diagrama de diseño del sistema general:

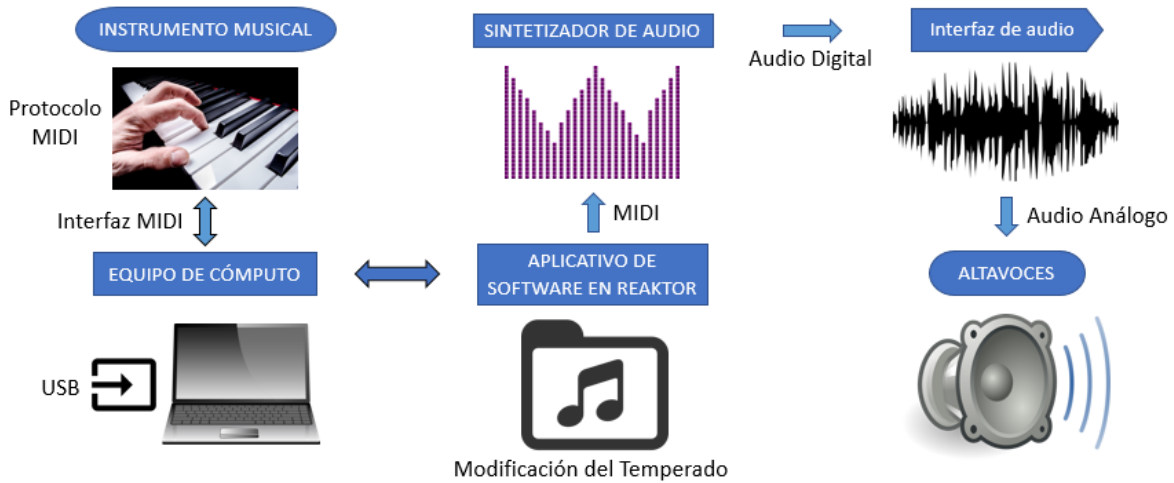


Ilustración 11. Diagrama arquitectura del sistema

5. DISEÑO DE DETALLE

Tomando como punto de partida el concepto de solución del sistema, se establecieron tres (3) funciones generales para el software y las sub-funciones relacionadas:

FUNCIONES	DESCRIPCIÓN	SUB-FUNCIONES
Detección de patrones de interpretación musical	Reconocimiento de intervalos y acordes interpretados a través de un controlador musical compatible con <i>MIDI</i>	Detección de intervalos musicales: segunda menor y mayor, tercera menor y mayor, cuarta justa, quinta disminuida y justa, sexta menor y mayor, séptima menor y mayor, octava justa.
		Detección de triadas musicales: mayor, menor, disminuida.
		Detección de acordes musicales: Maj 7, dominante, menor, semi-disminuido 7, disminuido 7.
Modificación del temperado de las notas musicales	Base de datos a partir de la cual es posible leer y escribir las proporciones entre los tonos de diferentes temperados musicales	Temperado manual: menú de selección a través del cual es posible explorar diferentes tipos de temperado (p. ej. Pitagórico, Aristogénico, Igual, etc.).
		Temperado dinámico: el software modificará automáticamente el temperado dependiendo de los patrones de interpretación ejecutados por el usuario a través del controlador musical.
Síntesis de audio	Conversión de la información <i>MIDI</i> en una señal de audio	Sintetizador Interno: cuatro formas de onda conmutables (sinusoidal, triangular, cuadrada y sierra) y controles de envolvente acústica (ataque, decaimiento, sostenimiento y relajación).
		Salida de datos desde el software hacia cualquier sintetizador externo compatible con el protocolo <i>MIDI</i> .

Tabla 4. Funciones de software

A partir del reconocimiento de las funciones que debía cumplir el software, se diseñó un diagrama de flujo de datos que contemplaba el proceso de ingreso de la información musical, el reconocimiento de los patrones de interpretación por parte del usuario, la modificación del temperado de las notas musicales y la salida de la información para ser procesada por un sintetizador de audio:

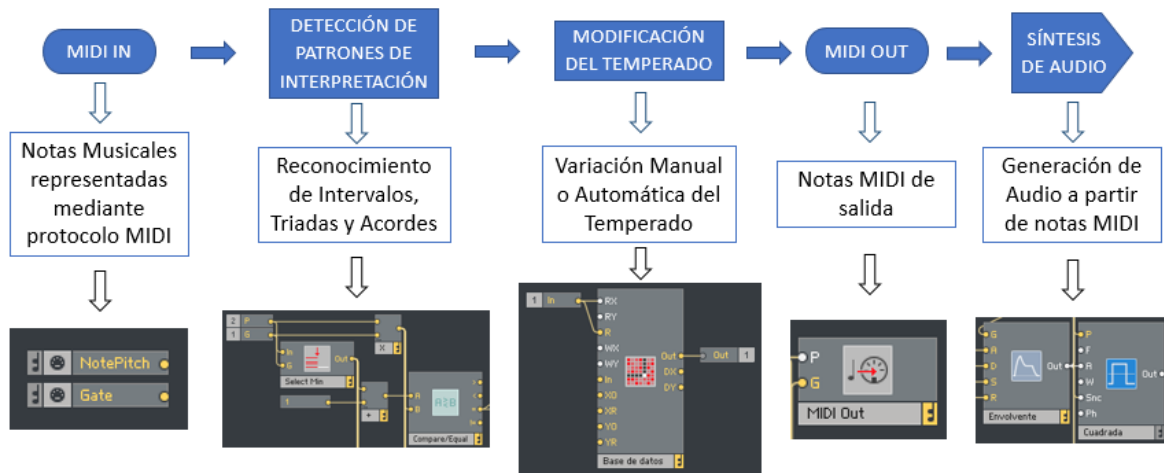


Ilustración 12. Diagrama de diseño de software

Los diagramas de bloques del software y la descripción de las estructuras de programación responsables de su funcionamiento se presentan en el documento **“Descripción del Programa”**.

7. TEMPERADO DINÁMICO

Para incorporar la función de modificación del temperado en IMVTD fue necesario desarrollar las siguientes actividades:

Actividad	Técnica de recolección de información	Resultados
Documentación acerca de formas históricas de temperado, sus respectivas proporciones de frecuencias y usos	Exploración documental a través de fuentes bibliográficas	A partir de la información recolectada, respecto al uso relativamente extendido de algunas formas de temperado musical a través de la historia, y del análisis de las proporciones de frecuencias entre sus intervalos, se seleccionaron seis (6) formas diferentes de temperado
Evaluación de los fenómenos de batimiento y consonancia acústica producidos por diferentes intervalos y acordes musicales	Aplicación de encuestas auditivas en grupos de interés	Se identificaron las formas de temperado que, al ejecutar intervalos musicales, producen una menor sensación de batimiento acústico. De igual manera, se logró establecer cuáles temperados producen mayor sensación de consonancia acústica a partir de la ejecución de triadas y acordes musicales
	Visualización del fenómeno de batimiento mediante analizador de espectro de frecuencias	Se identificaron los temperados que producen un menor batimiento al ejecutar intervalos musicales

Tabla 5. Actividades para función de modificación del temperado

La siguiente tabla presenta la relación entre intervalos, semitonos, notas de referencia, proporción en frecuencia y denominación de los temperados musicales elegidos a partir de la actividad documental:

Intervalo	Semitonos	Nota	Temperados Musicales					
			Equitemperado	Pitagórico	Aristogénico	Kepler	Anónimo	Mersén
1	0	Do	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
2m	1	Do#	1,0595	1,0535	1,0625	1,0547	1,0535	1,0417
2M	2	Re	1,1225	1,1250	1,1250	1,1250	1,1237	1,1250
3m	3	Re#	1,1892	1,1852	1,1875	1,2000	1,1852	1,1719
3M	4	Mi	1,2599	1,2656	1,2500	1,2500	1,2500	1,2500
4J	5	Fa	1,3348	1,3333	1,3333	1,3333	1,3333	1,3333
5dis	6	Fa#	1,4142	1,4047	1,4000	1,4063	1,4047	1,3889
5J	7	Sol	1,4983	1,5000	1,5000	1,5000	1,5000	1,5000
6m	8	Sol#	1,5874	1,5802	1,5556	1,6000	1,5802	1,5625
6M	9	La	1,6818	1,6875	1,6667	1,6875	1,6856	1,6667
7m	10	La#	1,7818	1,7778	1,7500	1,8000	1,7778	1,7778
7M	11	Si	1,8877	1,8984	1,8750	1,8750	1,8750	1,8750
8J	12	Do	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000

Tabla 6. Temperados musicales elegidos para IMVTD

Las encuestas auditivas se aplicaron en dos grupos de interés caracterizados de la siguiente manera:

GRUPO DE INTERÉS	CARACTERIZACIÓN
Estudiantes	Jóvenes en edades entre los 16 y 25 años, estudiantes de programas en música, sonido y áreas afines
Profesionales	Profesionales en música, sonido y áreas afines con conocimientos o habilidades para la afinación de instrumentos musicales

Tabla 7. Caracterización de las personas que realizaron la encuesta auditiva

A partir de las encuestas auditivas, se identificó cuáles intervalos y acordes musicales producían una menor sensación de batimiento acústico y/o una mayor consonancia acústica. A continuación, se presentan los resultados de los temperados que produjeron una menor sensación de batimiento acústico sobre los grupos de interés a la hora de interpretar intervalos musicales:

TEMPERADO	Intervalos										
	2m	2M	3m	3M	4J	5dis	5J	6m	6M	7m	7M
Equitemperado											
Pitagórico	X	X	X		X	X	X	X (Low)	X	X	
Aristogénico		X	X	(X)	X	(X) (Low)	X				(X)
Kepler	X	X	(X) (Hi)	(X)	X	X	X	(X) (Hi)	X		(X)
Anónimo	X		X	(X)	X	X	X			X	(X)
Mersen		X		(X)	X		X	X (Low)		X	(X)

Tabla 8. Intervalos de menor batimiento en función de su temperado

Convenciones	
X:	Intervalos de menor batimiento acústico
(X):	Producen una modulación muy lenta
(Hi):	Tono alto en frecuencia
(Low):	Tono bajo en frecuencia
Relleno:	Intervalos con igual proporción de batimiento

Los resultados de los temperados que, al ejecutar triadas y acordes musicales, generaron una mayor sensación de consonancia acústica en los grupos de interés se presentan a continuación:

ACORDE	Mayor	menor	dis.	Maj 7	Dom.	menor 7m	Semi-dis. 7	Dis.7
INTERVALOS	3M, 5J	3m, 5J	3m, 5dis	3M, 7M	3M, 7m	3m, 7m	3m, 5dis, 7m	3m, 5dis, 6M
TEMPERADOS DE MAYOR CONSONANCIA	Equi-temp.	Pitag.	Equi-temp.	Equi-temp.	Pitag.	Equi-temp.	Equi-temp.	Anónimo

Tabla 9. Acordes con mayor consonancia acústica

Con los resultados de las encuestas auditivas se diseñó un algoritmo que, basado en el reconocimiento de patrones de interpretación en el instrumento musical, modifica de manera automática el temperado de las notas MIDI antes de llevarlas al sintetizador de audio. La anterior opción recibe el nombre de “temperado dinámico” en la interfaz de usuario.

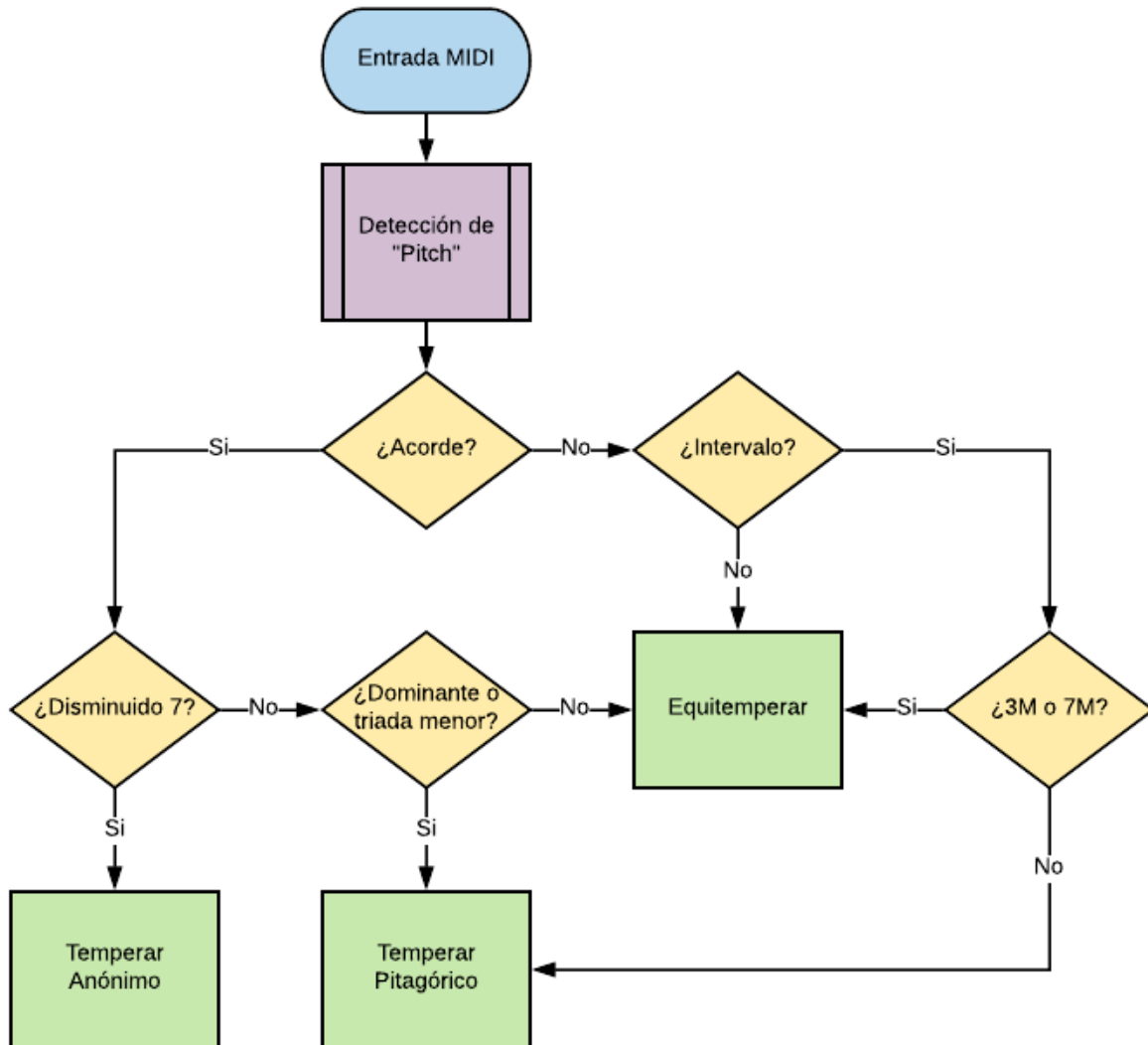


Ilustración 13. Diagrama algoritmo de temperado dinámico

8. INTERFAZ DE USUARIO

Con el ánimo de proponer un diseño de interacción adecuado para la interfaz de usuario, se definieron dos (2) grupos de interés sobre los cuales realizar entrevistas que permitieran conocer sus necesidades y expectativas con relación al software:

GRUPO DE INTERÉS	CARACTERIZACIÓN
Usuarios Potenciales	Músicos que exploran sistemas de afinación y composición para instrumentos de rango tonal extendido o ensambles de instrumentos musicales mediante recursos digitales.
Usuarios Incidentales	Artistas que experimentan con sistemas de afinación para música concreta. Personas que cuentan con entrenamiento auditivo musical, que utilizan instrumentos digitales o recursos de software para interpretar o producir música asistida por computador.

Tabla 10. Caracterización de los posibles usuarios

A partir de las entrevistas, fue posible detectar que las necesidades más recurrentes eran comunes en los dos grupos de interés, se presentan a continuación:

	Necesidades Detectadas	Soluciones Propuestas	Observaciones
1.	Visualización del nombre del temperado en el display de la base de datos	Incluir texto en la parte superior del área correspondiente a cada temperado	Implementado
2.	Inclusión de botón de "Pánico" MIDI	El uso del interruptor del motor de procesamiento del programa cancelará cualquier mensaje MIDI	Implementado
3.	Incluir escalas en la base de datos mediante una herramienta tipo lápiz o similar		La base de datos permite edición gráfica directa, sin embargo el nivel de detalle que se requeriría para un ajuste preciso hace que la inclusión de los valores deba hacerse desde un archivo externo

Ilustración 14. Necesidades para diseño de interacción

La interfaz de usuario se propuso dividida en tres (3) áreas correspondientes a las funciones principales del software. Se plantearon controles a manera de menús, botones, deslizadores y perillas de fácil acceso que permitieran configurar y manipular la herramienta de manera ágil.

Las distancias entre los intervalos de cada temperado pueden visualizarse en la sección "Temperados" (display negro a la izquierda). Las notas de la escala se representan como pequeñas líneas horizontales y se dispone una línea de reproducción vertical que permite observar la altura de la tonalidad que se está interpretando.

La sección "Sintetizador Interno > Formas de Onda" se habilita cuando el usuario decide implementar el sintetizador interno de IMVTD (menú de selección "INT/EXT"); permitiendo activar, desactivar y controlar el nivel de salida de los osciladores de manera independiente, así como los tiempos y el nivel de su envolvente acústica.

En la sección central de la interfaz, es posible visualizar el máximo número de “voces” que el sintetizador reproduce de manera simultánea (polifonía). A partir de menús desplegables es posible seleccionar el modo de temperado (Manual o Dinámico) y el tipo de temperado (en caso de modo de temperado manual).

En la sección inferior, se dispone un sistema de leds que se activan cuando el software detecta intervalos, triadas y/o acordes musicales.

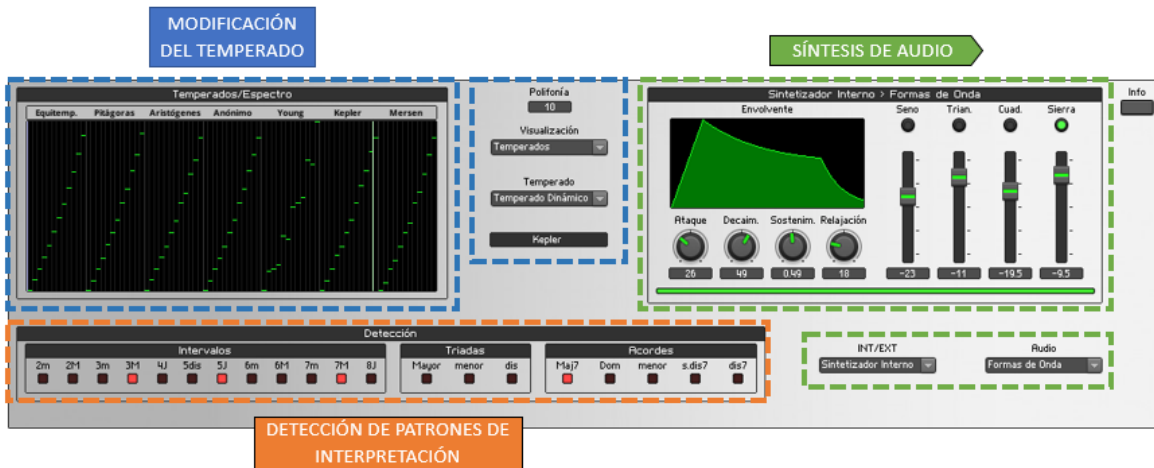


Ilustración 15. Interfaz de Usuario

Adicionalmente, se propuso una sección complementaria, con la definición del concepto de temperado y un gráfico de barras que ilustrara, de manera comparativa, la distancia de frecuencia existente entre las escalas temperadas del software:

Información para el usuario

¿Qué es el temperado?

El temperado es la distancia entre las notas de una escala musical

La escala musical occidental posee 12 notas que se repiten periódicamente subiendo o bajando de tonalidad

Las distancias entre las notas pueden modificarse para buscar mayor o menor consonancia cuando se tocan simultáneamente

Cuadros con mensajes de ayuda

Comparación entre las escalas temperadas que usa IMVTD

NOTAS MUSICALES

■ Equitemperado ■ Pitagórico ■ Aristogénico ■ Kepler ■ Anónimo ■ Mersén

Ilustración 16. Información para el usuario

9. REFERENCIAS

- Arenzana, V., & Arenzana, J. (1998). Aproximación matemática a la música. *Números. Revista de didáctica de las matemáticas*, 35, 17-31.
- Beltrán, C. (2013). La música en los grandes matemáticos de occidente. *Música Cultura y Pensamiento*. Vol. 5, Nº 5, pp. 111-117
- Carrión, V.C. (2010). Matemáticas para afinar instrumentos musicales. *SUMA*, 65, 99-104.
- Del Río, H. L. E. B. (2012). Física y Psicoacústica de la Teoría Musical, la Afinación y el Temperamento.
- Duffin, R. W. (2008). How equal temperament ruined harmony (and why you should care). WW Norton & Company.
- Pabón, G. C. (2010). Teoría de la proporción pitagórica. *Escritos*,14(33), 600-617.
- Pastor, A. (2008). Matemáticas en la música. *SUMA*, 59, 17-21.
- Pérez, A. S. G., & Fraile, D. G. (2006). El concepto de consonancia en la Teoría musical. De la escuela pitagórica a la Revolución científica. *Revista de musicología*, 29(1), 321-323.
- Plamondon, J., Milne, A., & Sethares, W. (2009). Dynamic Tonality: Extending the Framework of Tonality into the 21st Century. In *Proc. of the Annual Conference of the South-Central Chapter of the College Music Society*.
- Redondo, J. M. (2008). Una relación entre la matemática y la escala occidental cromática temperada.
- Sel, A., & Calvo-Merino, B. (2013). Neuro arquitectura de la emoción musical. *revista de Neurología*, 56(5), 289-297.