

PROGRAMA DE INGENIERÍA FÍSICA

CONSTRUCCIÓN DE UN AFINADOR DIGITAL COMO ALTERNATIVA DE AJUSTE
DE LAS FRECUENCIAS DE UN PIANO UTILIZANDO LA FFT EN ARDUINO

LAURA GERALDINE GUTIÉRREZ RAMIREZ

DANIELA POSADA GAVIRIA

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE INGENIERIAS

PEREIRA

MARZO, 21 DE 2019

AGRADECIMIENTOS

A nuestras familias, nuestros padres por ser incondicionales, por su paciencia y por siempre darnos una voz de aliento, su sonrisa y ofrecernos lo mejor en todos los momentos; por ser consejeros, amigos y habernos forjado como las personas que somos hoy, llevándonos al sendero correcto.

Al profesor Sebastián Martínez, por todo el apoyo, todos los elementos que nos brindó, todos los conocimientos que nos compartió y en especial por toda la paciencia. Estaremos eternamente agradecidas.

A nuestros compañeros Santiago Osorio, Daniela Henao, Juan Pablo Uchima y Daniel Vanegas por todo el apoyo y la amistad que nos han brindado a través de los años.

A Daniel parra, que ha sido uno de nuestros pilares en la universidad, quien nos dio un apoyo incondicional y siempre estuvo ahí para nosotras por no dejarnos rendir jamás y por ser el amigo más incondicional que existe.

A todo el equipo de Audifarma S.A quienes nos abrieron las puertas de su empresa, en especial a Lina Zuleta y las metrólogas Johana y Laura, por darnos esa maravillosa y única oportunidad de hacer parte de ese increíble equipo.

A todos nuestros profesores quienes nos brindaron muchas experiencias tanto académicas como personales.

A los amigos y seres queridos que nos ayudaron en toda ésta construcción, que dejamos de mencionar pero nos contribuyeron a ser mejores cada día, infinitas gracias.

Y por último a la facultad de Ingeniería Física, por recibirnos y brindarnos la oportunidad crecer; siempre estaremos orgullosas de ser parte de esta familia.

ÍNDICE DE CONTENIDO

PRÒLOGO	5
INTRODUCCION.....	6
CAPITULO 1 EL SONIDO	¡Error! Marcador no definido. 7
1.1.1 CARACTERISTICAS DEL SONIDO	7
1.1.2 ACÚSTICA	8
1.1.3 AMPLITUD.....	8
1.1.4 FRECUENCIA	8
1.1.5 VELOCIDAD.....	9
1.1.6 LONGITUD DE ONDA.....	9
1.1.7 ONDAS DE SONIDO	¡Error! Marcador no definido. 10
1.1.8 ONDAS DE PRESIÓN	10
1.1.9 PRESION SONORA.....	10
1.1.10 INTERVALOS Y TONOS MUSICALES	10
1.1.11 LAS ESCALAS MUSICALES	13
1.1.12 DESAFINACIÓN DE UN INSTRUMENTO	13
1.1.13 CONDICIONES DE AFINACIÓN DE UN PIANO.	16
1.1.14 TEORIA Y TÉCNICA DE AFINACIÓN	17
CAPITULO 2. CONDICIONES INTELECTUALES DE AFINACIÓN	18
CAPITULO 3. ALGORITMOS PARA PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES A SER USADOS EN EL AFINADOR.....	19
3.1.1 ACERCAMIENTO AL CÁLCULO DE LA TRANSFORMADA FFT.....	19
3.1.2 TRANFORMADA DE FOURIER: PROPIEDADES Y APLICACIONES ...	20
3.1.3 TRANSFORMADA DISCRETA DE FOURIER ¡Error! Marcador no definido.	
3.1.4 (FFT) FAST FOURIER TRANSFORM APLICADA	20

3.1.5 REDUCCIÓN DE FRECUENCIA DE MUESTREO APARTIR DEL CÁLCULO EN LA FFT.....	21
3.1.6 INCREMENTO DE FRECUENCIA DE MUESTREO APARTIR DEL CÁLCULO EN LA FFT.....	22
CAPITULO 4. DISEÑO METODOLÓGICO.....	23
4.1.1 CARACTERISTICAS DEL SENSOR DIGITAL DE SONIDO	23
4.1.2 LIBRERIAS PARA EL PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES	24
CAPITULO 5. DISEÑO DEL PROTOTIPO	25
5.1.1 HARDWARE	25
5.1.2 SOFTWARE.....	28
5.1.3 FUNCIONAMIENTO DEL PROGRAMA	30
CAPITULO 6. DISEÑO EN 3D FABRIACIÓN DEL COTENEDOR	33
6.1.1 PRUEBAS Y RESULTADOS	34
TABLAS DE RESULTADOS	37
CONCLUSIONES Y ANEXOS.....	39
RECOMENDACIONES	40
GLOSARIO	41
BIBLIOGRAFIA	41

PRÒLOGO

El piano, un instrumento de cuerdas percutidas creado alrededor de 1700, es un instrumento musical que ha acompañado estrechamente al hombre en su evolución por la música. El nombre del piano proviene de la palabra pianoforte, que es un término italiano que indica la posibilidad de sonar mucho o poco, dependiendo del vigor con que se teclee. Está compuesto por una caja de resonancia y un teclado mediante el cual se percuten las cuerdas de acero con macillos forrados de fieltro, produciendo el sonido, y aunque este instrumento se caracteriza por ser uno de los más sonoros utilizados en el mundo de la música no ha tenido un buen desarrollo tecnológico en cuanto su afinación; convirtiendo esta práctica en un problema para su propietario, ya que sólo un profesional, que no solo cuente con un oído armónico casi perfecto si no también con conocimientos electrónicos, está en la capacidad de hacerlo.

Para afinar un piano se debe tener en cuenta una serie de factores matemáticos para que éste quede armónicamente correcto, generando un problema para todas las personas que tienen este instrumento, pues deben pagar a un afinador para que calibre el piano por lo menos cada año.

Resulta oportuno entonces, recalcar que a diferencia del piano la informática ha avanzado a un ritmo exponencial en las últimas décadas, y la programación ha tenido que crecer de igual manera para poder brindar el hardware adecuado y así pueda ser más accesible no sólo desde el computador si no desde cualquier dispositivo electrónico; gracias a esto los instrumentos musicales como la guitarra han evolucionado refiriéndonos en términos de afinación, ya que los usuarios pueden tener afinadores cromáticos en el celular o en el mismo cuerpo de la guitarra permitiendo que el intérprete pueda afinarla en cuestión de minutos.

Debido a este problema, se formula la pregunta:

¿Es posible implementar un afinador digital que facilite el proceso de ajuste de un piano utilizando Arduino y el algoritmo fft?

INTRODUCCION

El piano es un instrumento armónico y que naturalmente, posee una serie de factores físicos que explican su sonido, estos pueden ser estudiados en un entorno de programación el cual puede ayudar a los músicos en uno de los problemas más grandes que poseen: la afinación del instrumento.

Pitágoras descubrió la forma de manejar siempre su vida en base a una relación matemática, y esto, no es excepción en la música; en esta se maneja una serie de divisiones que se denominan notas, y estas tienen una compleja estructura llamada armonía, la cual es uno de los pilares de la música y la afinación de los instrumentos.

Decodificando la armonía en lenguaje matemático, se puede decir que esta no es más que una relación de una frecuencia fundamental y sus múltiplos, por lo tanto para afinar un instrumento se debe tener la relación de cada cuerda con respecto a una frecuencia (generalmente dada en 440Hz) llamada fundamental y luego se ajusta para que cada cuerda quede con la frecuencia adecuada.

Aunque esto es algo que se puede realizar con la tecnología actual, no es un problema que se solucione de una manera teórica, porque aunque este instrumento se puede dividir en una serie de frecuencias fundamentales, existen algunos errores que se deben tener en cuenta a la hora de afinar, puesto que la naturaleza física del instrumento (como la tensión, la densidad, la temperatura, el grosor de la cuerda) pueden afectar esta medida, y que generaría una inarmonía en el instrumento.

Debido a lo anterior, se plantea como objetivo, crear un dispositivo como alternativa de ajuste del piano, teniendo en cuenta el análisis teórico, para así eliminar dicha inarmonía (o frecuencias que no sean múltiplos entre sí).

CAPÍTULO 1 EL SONIDO

“El sonido son ondas de presión y junto al silencio son la base de la música. Un objeto vibrando puede ser el origen del sonido, la vibración empuja el aire haciendo que se comprima y descomprima. Las modulaciones de presión se desplazan por el aire hasta poder llegar a nuestros sentidos mientras el objeto se atenúa”¹. (Dinámica de sistemas no lineales en la armonía, Acústica y Temperamentos - Afinación de pianos, Barcelona, 2005)

1.1.1 CARACTERÍSTICAS DEL SONIDO

Como se dijo anteriormente, el sonido es un fenómeno físico que se produce cuando existe una propagación de una onda mecánica y según lo que dice la física, al ser una onda ésta necesita de un medio para propagarse, el cual puede ser: sólido, líquido o gaseoso.

Cabe agregar que aunque todas las ondas mecánicas producen un sonido, el ser humano no puede escucharlas todas ya que solo tiene un rango auditivo de: 20 Hz - 20 kHz.² (University Physics, Wolfgang Bauer & Gory D. Westfall, 2011).

A continuación se enuncian algunas de sus propiedades: 3 (Teoría de la música, Juan Sebastián Guevara Sanín, pg. 6, 2010).

1. **altura:** indica la velocidad de vibración del cuerpo sonoro.
2. **Intensidad:** es congruente al tamaño de las crestas o picos de la onda, volviendo equivalente la amplitud y volumen.
3. **Duración:** informa del espacio temporal que ocupa desde su aparición hasta su extinción, es semejante al tiempo.
4. **Timbre:** identifica la fuente de cual proviene por la forma de las ondas, asegurando en las mismas condiciones el sonido producido será semejante al anterior

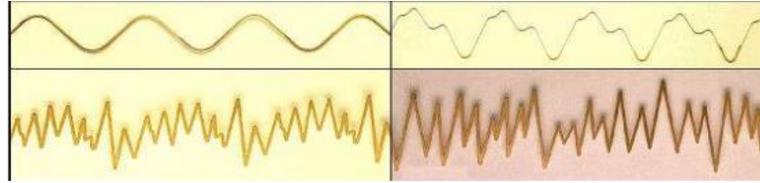


Figura 1. Ondas de sonido

1.1.2 ACÚSTICA

“La acústica es la rama de la física que estudia todos los fenómenos físicos que están vinculados a la generación, propagación y detección de ondas mecánicas que se escuchan en una banda de frecuencias, que se hacen llamar las ondas sonoras”.⁴ (la guía, Mónica González, 28 enero 2011).

En el ámbito musical, la acústica estudia la sonoridad, es decir se encarga de que todas las ondas generadas se acoplen bien y eviten el batimiento, el cual es un fenómeno físico que se genera entre dos ondas con frecuencias ligeramente distintas y que por alguna razón es incómoda para el oído humano.

1.1.3 AMPLITUD

En física, la amplitud hace referencia al desplazamiento de las moléculas en el medio, para la acústica una amplitud de una onda de sonido indica el grado de movimiento de dichas moléculas en el aire; este estudio ayuda a calcular la distancia que existe entre el pico de la onda y su base, el crecimiento de dicha distancia es proporcional a la intensidad del volumen del sonido

1.1.4 FRECUENCIA

La frecuencia es una medida física que permite determinar cuántas veces se repite un fenómeno determinado en una cantidad de tiempo. En música, la frecuencia permite diferenciar las diferentes notas musicales, la unidad de medida utilizada son los [Hertz].

1.1.5 VELOCIDAD

La velocidad es una magnitud física que permite calcular la distancia recorrida por un objeto en una cantidad de tiempo, por lo tanto la velocidad del sonido hace referencia a la distancia recorrida por una onda en una cantidad de tiempo.

La velocidad está dada por:

$$v = \sqrt{\frac{1.4 p_0}{\rho}} \quad (1)$$

Donde:

v = velocidad del sonido

ρ = Densidad del aire

p_0 = Presión atmosférica.

1.1.6 LONGITUD DE ONDA

Longitud de onda se entiende como la distancia que separa a dos moléculas que vibren en fase.

En un ciclo se cumple que:

$$\lambda = c/f \quad (2)$$

Donde:

c = Velocidad del sonido [m/s]

f = Frecuencia de la onda sonora [Hz]

λ = Longitud de onda [m]

1.1.7 ONDAS DE SONIDO

Una onda sonora es una onda elástica longitudinal que transmite el sonido, las variaciones de la presión producen que las moléculas se desplacen; dicho movimiento genera una vibración, lo cual produce lo que se conoce como sonido.

1.1.8 ONDAS DE PRESIÓN

Como se mencionó anteriormente, cuando las ondas de sonido se mueven generan una vibración; al ser este un sistema mecánico no uniforme, en especial a frecuencias altas, dicha vibración se conoce como ONDAS DE PRESION.

Cualquier material o estructura no puede transmitir una fuerza al instante pero lo hace a la velocidad del sonido en el material, ya que esta no es infinita. Si la fuerza que producen estas ondas es oscilatoria (tiene un m.a.s), generando que las ondas de presión se propaguen a través del medio y su longitud de onda sea la velocidad del sonido entre la frecuencia de la oscilación de la fuerza.

1.1.9 PRESIÓN SONORA

El sonido, puede considerarse como una sucesión de ondas de compresión y rarefacción que se propaga por el aire. Generalmente se puede observar como la presión atmosférica aumenta y disminuye periódicamente a medida que tienen lugar las sucesivas perturbaciones.

La presión atmosférica se mide en Pascal y es del orden de los 100.000 Pa (o como en los informes meteorológicos de 100 hPa). Sin embargo, cambios de presión debidos al pasaje de una onda sonora son muy pequeños respecto a este valor de presión atmosférica. Los sonidos más intensos que se perciben implican un incremento de 20 Pa. Por esta razón, para distinguir el incremento de presión de la presión atmosférica en ausencia de sonido se lo denomina **presión sonora (p)**. La presión sonora es la presión que se debe agregar a la presión atmosférica para obtener el valor real de presión atmosférica en presencia de sonido.

Las presiones sonoras audibles varían entre los 20 μ Pa y los 20 Pa, esta gran cantidad de cifras es incómoda de manejar. Es por esta razón y por razones fisiológicas que normalmente se expresa la presión sonora en dB y se denomina Nivel de Presión Sonora (NPS o SPL por sus iniciales en inglés). Se define un nivel de presión sonora de referencia, que es aproximadamente la mínima presión audible (20 μ Pa) [14].

Se define el Nivel de Presión Sonora como:

$$NPS(dB) = 20 \log\left(\frac{P}{P_{ref}}\right)$$

$$NPS_{ref} = 20 \log\left(\frac{P_{ref}}{P_{ref}}\right) = 20 \log(1)$$

$$NPS_{max} = 20 \log\left(P_{max} \frac{ref}{P_{ref}}\right) = 20 \log(1)$$
(3)

El nivel de referencia corresponde a 0dB mientras que el nivel sonoro máximo corresponde a 120dB. El rango de audición es entonces de 120dB.

Una sala de conciertos vacía	30 dB
Conversación susurrando	40 dB
Potencia máxima de un altoparlante doméstico	un 110 dB

1.1.10 INTERVALOS Y TONOS MUSICALES

Un intervalo se define como la diferencia de altura que existe entre dos sonidos, ambos se relacionan y generan lo que se llama amplitud, según las definiciones escritas anteriormente.

“Así como las distancias se pueden medir en metros, centímetros, etc.; en la música éstas se miden con: TONOS Y SEMITONOS”. (Teoría de la música, Juan Sebastián Guevara Sanín, pg. 33, 2010).

Se puede decir que los tonos y semitonos expresan las unidades de medida de la distancia más fundamentales en la música, ya que con base en ellas salen otras unidades que son un conjunto de éstas, los cuales se conocen como intervalos de quinta, tercera, cuarta, octava.

Todas las notas de la escala musical están separadas entre sí por varias relaciones matemáticas; como lo expresaba el pensador Arquitas de Tarento (siglo V a.c)

“En la música existen tres medidas: la primera es la media aritmética, la segunda es la geométrica y la tercera es la media subcontraria, denominada ARMÓNICA”.

La primera relación mencionada por arquitas es la media aritmética, la cual se escribe como:

$$b = \frac{a + c}{2} \quad (4)$$

Donde a es la nota fundamental (la primera de la sucesión de la escala musical) y c es la octava, es decir, la última nota de la sucesión de la escala musical.

Esta expresión se conoce en la música como intervalo de quinta.

La segunda, la media geométrica es expresa como:

$$\frac{a}{b} = \frac{b}{c} \quad (5)$$

La relación que en la música se conoce como INTERVALO DE OCTAVA, y es la que me dice el intervalo de la sucesión de la escala musical, es decir: me dice cuando termina una octava musical y comienza otra.

La tercera relación, la media armónica, esta expresada por la ecuación:

$$b = \frac{2ac}{a+c} \quad (6)$$

Donde a es la nota fundamental (la primera de la sucesión de la escala musical) y c es la octava, es decir, la última nota de la sucesión de la escala musical y en la música se denomina INTERVALO DE CUARTA.

Ahora, realizando el cociente de la media aritmética y la media armónica, obtenemos:

$$\frac{\left(\frac{a+c}{2}\right)}{\left(\frac{2ac}{a+c}\right)} \quad (7)$$

Se considera la más importante en la música, donde se conoce como INTERVALO DE TONO, el cual me determina la distancia en frecuencias entre una nota y otra.

En conclusión, la palabra tono es transcendental en la música y se puede definir como la relación matemática que me determina la distancia entre una nota y otra.

1.1.11 LAS ESCALAS MUSICALES

Una escala musical hace referencia al orden que existe entre los intervalos; ésta muestra la forma en la que deben ir ordenados los tonos y los semitonos; cada una de esas posiciones se les denominan grados. Gracias a los estudios realizados a través de los años por los matemáticos y los músicos, existen varias escalas musicales y las cuales tratan de explicar cuál debe ser la mejor forma de ordenarlos.

LA OCTAVA, LA ESCALA CROMÁTICA Y LA ESCALA DIATÓNICA

Debido a los estudios realizados por los matemáticos griegos, los sonidos fueron clasificados y simplificados, al punto de llegar a los 8 sonidos principales, los cuales se conocen como:

do re mi fa sol la si DO

Ésta sucesión de sonidos se repite varias veces dependiendo del instrumento musical; la distancia entre do y Do se conoce como octava, mientras que el orden de las notas se conoce como escala.

Existen muchas escalas musicales, pero en actualidad hay dos que predominan sobre las otras: la escala diatónica y la escala cromática. La escala diatónica es una escala que hace referencia a los intervalos llamados “naturales”. Muestra la distribución de los tonos en la octava musical, la cual se divide de la siguiente manera:

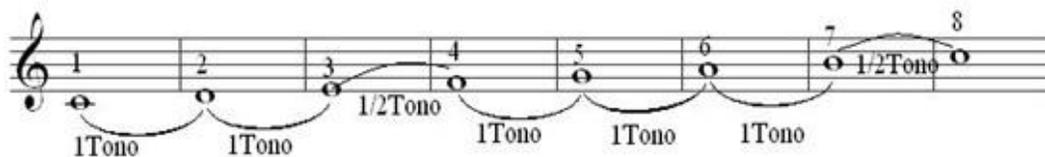


Figura 2. Conformación de la escala diatónica musical

Con el paso de los años, se encontró que dichos intervalos no eran suficientes y se generaron otros 5 más denominados alteraciones. Con estas nuevas frecuencias se creó otra escala más completa, llamada escala cromática. Esta escala es la utilizada en los pianos y se pueden reconocer como las teclas de color negro

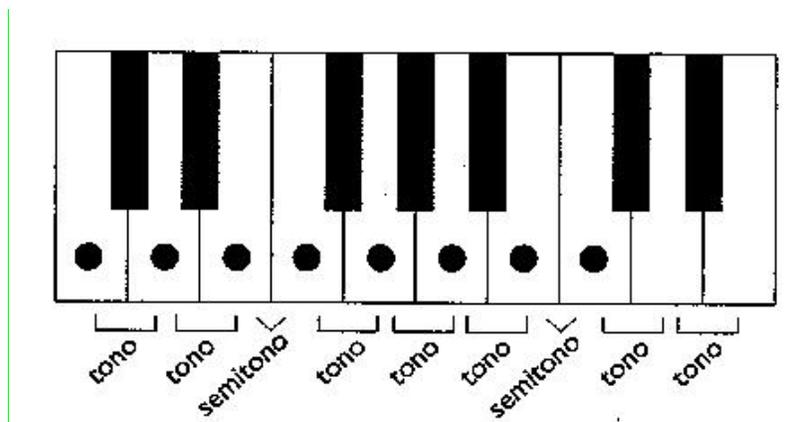


Figura 3. Conformación de la escala cromática musical

1.1.12 DESAFINACIÓN DE UN INSTRUMENTO

Existen distintas causas por las que el piano desafina; estas se pueden encontrar en distintas partes del instrumento, como son las cuerdas, las clavijas, la tabla armónica y el arpa, y además, atienden a diferentes factores como el material, el estado de los componentes y las condiciones ambientales en donde se encuentra el piano.

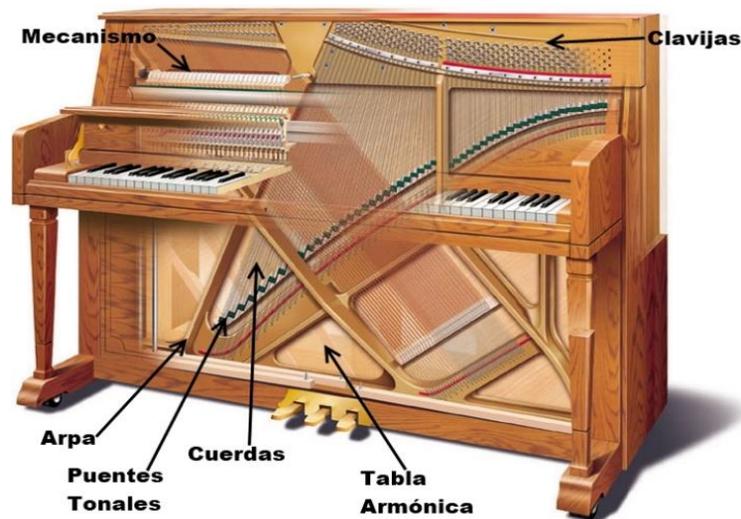


Figura 4. (Escuela de tecnología pianística de buenos aires, 1997-2018 Hugo J. Landolfi y TecnoPiano.com)

La madera es la principal materia prima del instrumento musical, tanto la tabla armónica como el puente y el clavijero están hechos de este material, muy sensible a la humedad. Por lo que aquí, intervienen las condiciones climáticas.

Generalmente, las frecuencias del piano tienden más a bajar que a subir, dado que las condiciones como la humedad o el cambio de temperatura afectan el estado de las cuerdas, produciendo que estas se dilaten y se desafinan.

El piano también se desafina por su uso diario, cuando los martillos del mecanismo golpean las cuerdas, éstas salen de su estado de reposo haciendo vibrar todo el instrumento, lo cual incluye desde la tabla armónica, al arpa, al clavijero y los traslados, así como el uso del piano de manera intensa o muchas horas diarias, son dos motivos comunes de desafinación.

Un piano en buen estado se desafina gradualmente y baja de tono alrededor de 1 Hz en un año. Si esta bajada se acumula el piano además de desafinado estará bajo de tono. Cuando se afine de nuevo todo el piano se tendrá que adaptar al cambio de tensiones de las cuerdas:

Cada cuerda tiene una media de 70 a 100 kilos de tensión (los bordones más graves llegan a los 200 kg), que sumadas dan entre 15 y 20 toneladas que deben aguantar el clavijero, el arpa y la tabla armónica (además las cuerdas hacen una fuerza de unos 360 kg sobre el puente, y éste sobre la tabla armónica). Si se sube la tensión de todas las cuerdas de un piano, el cambio de peso es muy importante y necesita días para adaptarse y repartir la tensión, esta adaptación conlleva una desafinación. (Tipler y Mosca, 6a edición, Capítulo 15, 17 de abril 2012).

Existen pianos que necesitan afinaciones regulares:

- Los pianos que tienen mucho uso, como los de las escuelas de música.
- Los pianos con requerimientos especiales como los de concierto o salas de grabación.
- Los pianos nuevos deben afinarse el mismo año porque bajan de tono antes por estar todavía adaptándose a las tensiones de las cuerdas y a la humedad del ambiente
- Los pianos que han sido trasladados deben afinarse a las 2 o 3 semanas después del traslado, cuando las maderas del piano se han adaptado a la humedad.
- Los pianos situados en lugares con grandes cambios de humedad, así como los pianos situados cerca de aires acondicionados o radiadores, con incidencia del sol o corrientes de aire, se desafinan antes.

1.1.13 CONDICIONES DE AFINACIÓN PARA UN PIANO

La afinación de un piano consiste en el ajuste de las tensiones de las cuerdas para que estas se alineen con los intervalos, por lo general la frecuencia base es el sonido de 440 (correspondiente a la nota la).

Frecuencia (en Hertzios) de las notas musicales

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

Figura 5. Relación ideal notas musicales

1.1.14 TEORÍA Y TÉCNICA DE LA AFINACIÓN

La afinación del piano es el ajuste de las tensiones de sus cuerdas moviendo las clavijas para tensar (más agudo) o destensar (más grave) y que haya una sonoridad correcta de los intervalos y sus armónicos. Se toma normalmente como origen el 'la' a 440Hz, pudiendo cogerse el 'la' a mayor frecuencia si se requiere (por ejemplo para tocar con instrumentos de viento o con orquesta, o para tener un tono ligeramente más brillante) o a menor, con un piano antiguo que no puede soportar tanta tensión.

Dentro de la afinación suele hablarse de afinación electrónica o aural dependiendo de si se utiliza un aparato para medir las frecuencias o si se basa en el oído para reconocer los intervalos. La ventaja de afinar de oído es tener en consideración los inarmónicos de las cuerdas del piano.

Los pianos normalmente constan de 88 notas que tienen 1, 2 o 3 cuerdas por tecla (coros y bordones). Cada tecla debe sonar como si fuera una sola cuerda.

CAPITULO 2. CONDICIONES INTELECTUALES DE LA AFINACIÓN

Actualmente, la forma más utilizada de afinar un piano es a través del temperamento igual, el cual consiste en dividir las octavas en 1200 Cents, en donde teóricamente a cada semitono le pertenece un total de 100 cents, pero, en realidad el temperamento igual genera problemas a la hora de la distribución de las frecuencias, por ejemplo:

“Si se parte de un ‘la’ a 440Hz su quinta justa sería de 660Hz, sin embargo una quinta temperada de 700 cents (temperamento igual) da 659.3Hz. Esa ligera diferencia es suficiente para que el oído note “batidos” entre la tónica y la quinta”. (Afinador de pianos, Barcelona, 2005)

Por lo que en total quedan a rededor de 24 cents que se deben repartir entre las demás notas musicales, generalmente estos intervalos se distribuyen entre las frecuencias más altas y más bajas ara mejorar los batidos de estos.

CAPÍTULO 3. ALGORITMOS PARA PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES A SER USADOS EN EL AFINADOR

El Procesamiento Digital de Señal es una operación o transformación de una señal en un hardware digital según reglas bien definidas las cuales son introducidas al hardware a través de un software específico que puede o no manejar lenguajes tanto de alto como de bajo nivel.

Procesamiento Digital de Señal se refiere al procesamiento digital de señales tales como sonido, radio y microondas usando técnicas matemáticas para realizar transformaciones o extraer información. En la práctica, las características que hacen a los DSP's (Digital Signal Processing) tan buenos en el manejo de señales los hacen adecuados para muchos otros propósitos, tales como procesamiento de gráficos de alta calidad y simulaciones en ingeniería. Eventualmente cuándo el DSP ha terminado su trabajo, los datos digitales pueden convertirse otra vez a señales analógicas, con calidad mejorada.

Una forma de clasificar los DSP's y sus aplicaciones es a través de su rango dinámico. El rango dinámico es un conjunto de números, de pequeños a grandes, que pueden ser procesados en el curso de una aplicación. La capacidad del procesador es una función de su rango de datos (el número de bits manipulados) y el tipo de aritmética que posee (punto fijo o flotante). Cada tipo de procesador es ideal para un rango particular de aplicaciones. DSP's de 16 bits son ideales para sistemas de voz. Una de las más importantes características de un DSP es su capacidad de realizar operaciones de multiplicación y acumulación (MACs) en sólo un ciclo [21].

3.1.1 ACERCAMIENTO AL CÁLCULO DE LA TRANSFORMADA FFT

La transformada de Fourier es una operación matemática que transforma una señal de dominio en el tiempo a dominio en la frecuencia . Una DFT (Transformada de Fourier Discreta - por sus siglas en inglés) es el nombre dado a la transformada de Fourier cuando se aplica a una señal digital (discreta) en vez de una análoga (continua).

Una FFT (Transformada Rápida de Fourier) es una versión más rápida de la DFT que puede ser aplicada cuando el número de muestras de la señal es una potencia de dos. Un cálculo de FFT toma aproximadamente $N \log_2(N)$ operaciones, mientras que DFT toma aproximadamente N^2 operaciones, por lo que la FFT es significativamente más rápida. Si la señal no es periódica, el período P aumenta hasta el infinito [11].

3.1.2 TRANSFORMADA DE FOURIER: PROPIEDADES Y APLICACIONES

La transformada de Fourier y el análisis armónico en general constituye hoy una de las herramientas más útiles para el estudio y el tratamiento de múltiples aspectos de las ecuaciones en derivadas parciales. Podría decirse que en este ámbito desempeña un papel análogo al de la transformada de Laplace en el campo de las ecuaciones diferenciales ordinarias, permitiendo simplificaciones notables en las ecuaciones toda vez que contribuye a transformar derivadas en potencias, esto es, operadores diferenciales en polinomios. Es también significativo el papel que la transformada de Fourier juega en el terreno de las aplicaciones, fundamentalmente en teoría de la señal, teoría cuántica de campos, tomografía y tratamiento y digitalización de imágenes [10].

3.1.3 TRANSFORMADA DISCRETA DE FOURIER

Una DFT (Transformada de Fourier Discreta - por sus siglas en inglés) es el nombre dado a la transformada de Fourier cuando se aplica a una señal digital (discreta) en vez de una análoga (continua). Una FFT (Transformada Rápida de Fourier) es una versión más rápida de la DFT que puede ser aplicada cuando el número de muestras de la señal es una potencia de dos. Un cálculo de FFT toma aproximadamente $N * \log_2(N)$ operaciones, mientras que DFT toma aproximadamente N^2 operaciones, así es que la FFT es significativamente más rápida [21].

3.1.4 (FFT) FAST FOURIER TRANSFORM APLICADA

Para realizar el cálculo de la DFT se requiere una gran cantidad de operaciones. Por ejemplo, para una DFT de N puntos habrá N multiplicaciones complejas y N sumas complejas. Luego habrá N componentes armónicas para ser evaluadas. Es decir, el cálculo de una DFT de N puntos requiere N^2 multiplicaciones complejas y $N(N - 1)$ sumas complejas [12].

Si $N = 1024$, se requiere una cantidad aproximada de dos millones de operaciones complejas.

Diferentes técnicas son utilizadas para aprovechar las propiedades de simetría de la DFT y disminuir el número de operaciones necesarias para su cálculo. El desarrollo de la Fast Fourier Transform (FFT) para el cálculo de la DFT de señales discretas en el tiempo y de duración finita, utiliza técnicas computacionales para el procesamiento y el análisis de señales.

3.1.5 REDUCCIÓN DE LA FRECUENCIA DE MUESTREO A PARTIR DEL CÁLCULO EN LA FFT

El diagrama de bloques representado en la Figura 4.1 consiste en un filtro digital antialiasing (h, k), y un compresor de la frecuencia de muestreo de f_s a f_s/M . Representa el proceso de diezmar una señal $f[n]$ por un factor entero M [13].

$$y(m) = w(mM) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(k) \cdot f(mM - k) \quad (9)$$

Donde, $y(m)$ es la relación de entrada/salida del proceso, $h(k)$ es el filtro digital y $f(mM - k)$ es la señal de acuerdo a la frecuencia de muestreo, donde:

$$w(n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(k) \cdot f(n - k)$$

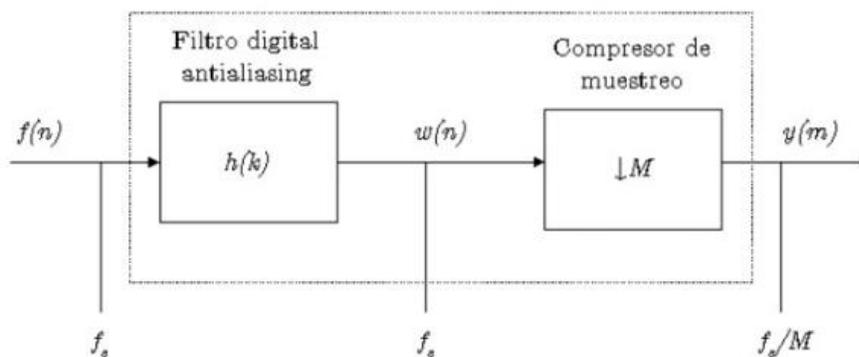


Figura 3.1 Diagrama de bloques por un factor M.

3.1.6 INCREMENTO DE LA FRECUENCIA DE MUESTREO A PARTIR DEL CÁLCULO EN LA FFT

Dada una señal $f[n]$, y una frecuencia de muestreo f_s , el proceso de interpolación descrito en la Figura 3.2, incrementa la frecuencia de muestreo a Lf_s . Esto indica que es un proceso de expansión y la relación entrada – salida es [13]

$$y(m) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(k) \cdot w(m-k) \quad (10)$$

Donde,

$$w(m) = \begin{cases} f\left(\frac{m}{L}\right), & m = 0, \pm L, \pm 2L, \dots \\ 0 & \end{cases}$$

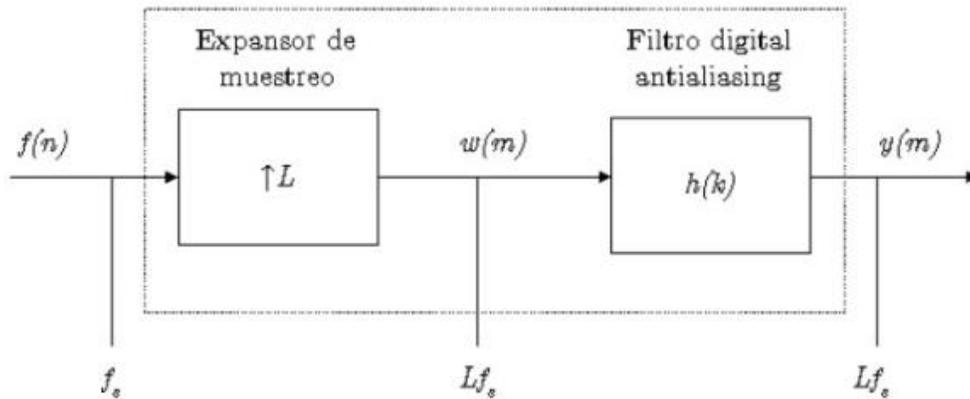


Figura 3.2 Diagrama de bloques por interpolación de factor L.

CAPITULO 4 DISEÑO METODOLÓGICO

4.1.1 CARACTERISTICAS DEL SENSOR DIGITAL DE SONIDO

El sensor Model Number FBA_4330948551 no es sólo un controlador digital de señales, sino que también es un dispositivo con la funcionalidad para medir la intensidad de sonido, posee una salida digital y otra analógica, acompañado de un micrófono cilíndrico de alta sensibilidad [19].

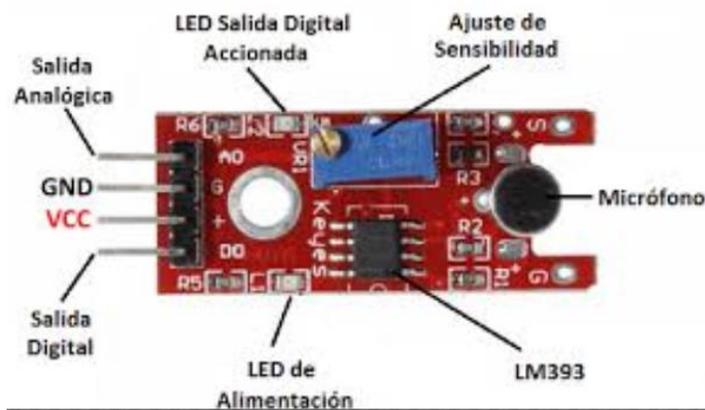


Figura 4.1 Diagrama distribución general pines módulo de sonido

CARACTERISITICAS PRINCIPALES

El sensor es sensible respecto al sonido circundante, permitiendo emitir un valor analógico, puede configurar el valor de sonido y luego el valor digital de salida; la sensibilidad es ajustable de acuerdo al rendimiento estable configurando 4.5 V Voltaje de trabajo, admite tanto el valor digital de salida como el valor analógico de salida.

La salida de señal de voltaje analógica, amplitud de señal es $VCC / 2$; para obtener la intensidad del sonido de la señal de voltaje a través de la transformada AD, se puede explicar a partir del puerto: DO para salida digital, AO para salida analógica, aplicable a variedad de plataformas incluyendo Arduino / AVR / ARM [19].

4.1.2 LIBRERIAS PARA EL PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES

La biblioteca de Arduino FFT es una rápida implementación de un algoritmo de FFT estándar que opera únicamente en datos reales. Se puede ajustar de 16 a 256 bits Y permite trabajar con FFT directamente desde la placa Arduino y mandar el resultante a la pc mediante puerto Serial [22].

Al implementar la librería FFT, hay que multiplicar las variables de entrada por el coseno fijos y constantes sinusoidales., esto es lo que consume la mayor parte del tiempo en el Arduino Mega, como $16b \times 16b$ multiplica toman alrededor de 18 ciclos de reloj. Por otro lado, $16b + 16b$ añade sólo tienen 2 ciclos de reloj. Por lo tanto, es mejor de lo que es añadir a multiplicarse. Como resultado, muchos de esos constantes seno y coseno utilizados en la FFT son sólo 0 o 1, por lo que no tiene que multiplicarse, y sólo se puede añadir, en una FFT de 256 puntos, hay 1.024 multiplicaciones complejas que hay que hacer, de las cuales 382 son 0 / 1.

El Arduino FFT comprueba los 0 o 1 condiciones, y simplemente lo hace, añade en su lugar. como resultado, esas constantes se producen a intervalos regulares llevando así, a comprobar los beneficios de este tipo de enfoque se limitan para FFT más grandes. El ahorro total es $(1,5 * N - 2)$ para un tamaño de FFT de N, mientras que el número total de multiplica es $(N / 2) * \log_2(N)$. Esto da una relación de ahorro de $3/\log_2(N)$, que baja a medida que N aumenta.

CAPITULO 5. DISEÑO DEL PROTOTIPO

El diseño del prototipo se implementará de forma que brinde bienestar y comodidad al usuario, de modo que el afinador se presente como alternativa de ajuste del instrumento musical al usuario, siendo portátil y de fácil manejo; la pantalla cuenta con un botón de encendido y apagado, dos botones de control uno de los cuales realiza la selección de las opciones que posee el afinador y el otro ayuda a la búsqueda de dichas opciones, tiene un micrófono por el cual se ingresa la señal de audio al microcontrolador y una pantalla táctil que permite visualizar el menú.

5.1.1 HARDWARE

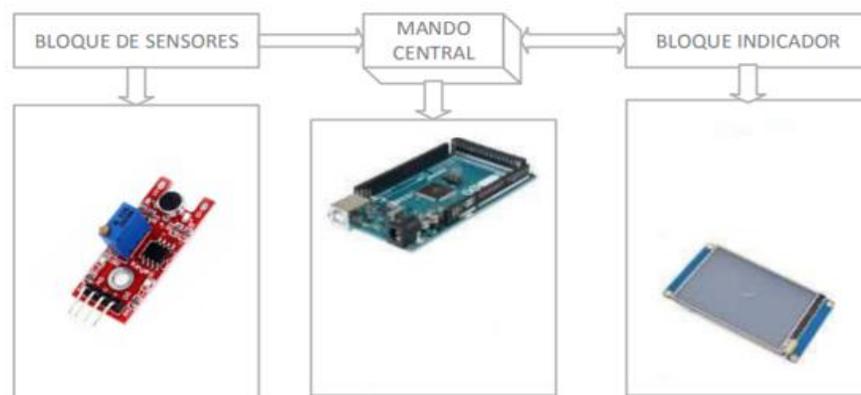


Figura 5.1. Diagrama de Bloques

Para el prototipo propuesto, se tiene el primer bloque designado al ingreso de la señal y amplificación de la misma, es necesario realizar una amplificación de la señal de audio dado que el micrófono que se está utilizando tiene un voltaje de salida máximo de 100mV, este valor de voltaje no es suficiente para que el microcontrolador pueda adquirir los datos analógicos para realizar la conversión analógica – digital, en esta etapa se usa el amplificador operacional LM386, luego de ello, se procede al ingreso de la señal de audio; el siguiente paso es tomar las muestras analógicas necesarias para obtener el espectro de frecuencias por medio de la FFT, para obtener un valor más cercano a la realidad fue necesario hacer una discriminación de los valores de voltaje que ingresan al microcontrolador.

RECEPCIÓN DE AUDIO

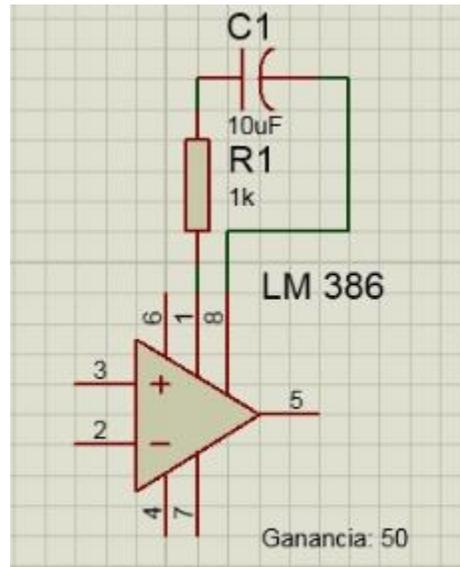


Figura 5.2 Diagrama de la recepción de audio

En la Figura 5.2 se muestra el ingreso de la señal de audio por medio de un circuito integrado (LM386) que consiste en un amplificador que requiere bajo voltaje, debido a que la señal de entrada del micrófono tiene una señal máxima de 100mV, por lo que es necesario realizar una amplificación para poder ingresar al controlador y realizar la conversión A/D, para realizar esta etapa es necesario un voltaje de entrada comprendido entre 1V y 5V.

AMPLIFICACIÓN Y TRATAMIENTO DE LA SEÑAL

De la amplificación de la señal se encarga un amplificador de audio, el LM386. Tiene una serie de características que lo hacen ideal para el propósito para el que se utiliza:

1. Aunque trabaja con tensiones negativas, ya que la diferencia de tensión que viene del piezoeléctrico es una onda sinusoidal con valor medio 0V, se alimenta con tensiones positivas, en este caso 5V. Gracias a esto, puede haber una única “tierra” para todo el circuito y la conexión de las dos pilas es más sencilla, y no hay que sacar un cable entre las dos para referenciarlo a la tierra del amplificador.

2. La ganancia se puede cambiar colocando una resistencia y/o un condensador de $10\ \mu\text{F}$, para obtener una ganancia de 200.

3. Bajo consumo, alimentado a 6V consume 24 mW, lo cual es ideal para el funcionamiento. Tiene un potenciómetro a la entrada para control de volumen porque es un amplificador.

4. Pese a que la alimentación es entre 5 y 0 voltios, la salida del amplificador está a 2,5V. Este offset es imprescindible para que el arduino pueda leer la señal amplificada, ya que la señal del piezoeléctrico es una señal “sinusoidal” que oscila en torno al cero y arduino solamente acepta valores de entrada positivos entre 0 y 5V. Además tensiones negativas podrían dañarlo.

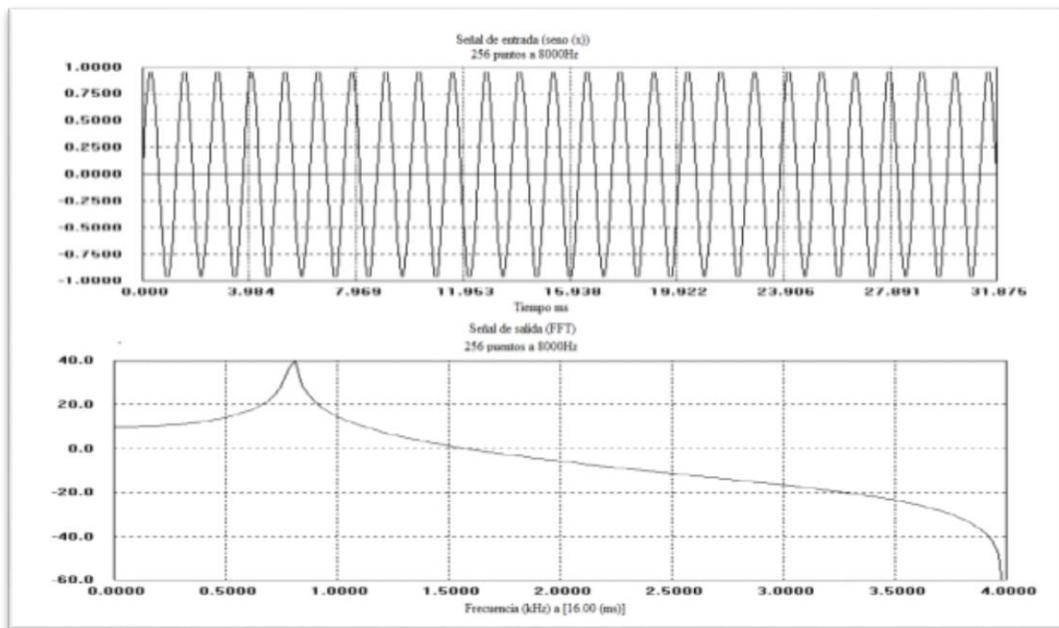


Figura 5.3 Comparación de la frecuencia de entrada seno (x) obtenida, con la frecuencia establecida para una nota musical de acuerdo a la escala temperada

Una vez obtenidos los valores de voltaje se procede a digitalizar la señal, la cual pasará luego a la etapa en la que obtendrá el espectro de frecuencias del que se sacará el valor con la mayor energía siendo este el resultado de frecuencia de la señal ingresada. Existe ya en el dispositivo configurado internamente una tabla de valores para las frecuencias de cada una de las cuerdas que pueden ser afinadas, con la se comparará el valor de frecuencia obtenido en la etapa anterior, en la etapa de comparación existen tres posibilidades de comparación, la primera que el valor de frecuencia obtenido sea mayor que el valor asignado en la tabla (debe

minimizar la tensión de la cuerda), la segunda que el valor de frecuencia obtenido sea menor que el valor asignado en la tabla (debe ajustarse la cuerda) y la tercera que el valor de frecuencia obtenido sea igual que el valor asignado en la tabla (afinación correcta).

SISTEMA DE CONTROL

Del control del sistema se encarga el Arduino Mega 2560. Arduino es una plataforma de hardware libre, basada en una placa con un microcontrolador y un entorno de desarrollo, diseñada para facilitar el uso de la electrónica en proyectos multidisciplinarios.

Los microcontroladores son circuitos integrados programables que incluyen en su interior las unidades funcionales principales de un computador: CPU, memoria y periféricos de entrada/salida. El Arduino Mega, en concreto, tiene 54 entradas/salidas digitales de las cuales 15 pueden usarse para generar PWM y 16 entradas analógicas. Se programa mediante el software de Arduino que se puede descargar directamente de internet y utiliza un lenguaje de programación propio basado en el lenguaje de programación de alto nivel Processing que es similar a C++ [22].

ALIMENTACIÓN

Para el funcionamiento del dispositivo solo es necesario de una fuente de 5Vdc, Por lo que se decidió alimentar el afinador con una batería mediante un divisor de voltaje para obtener la alimentación necesaria.

5.1.2 SOFTWARE

El afinador de instrumentos musicales está provisto de una pantalla táctil para la interacción con el usuario, ofreciendo la oportunidad de seleccionar la tarea que desea realizar, así como también visualizar la respuesta que le proporciona el dispositivo. Una vez que se ha escogido una cuerda en especial para afinar, se deberá ingresar la señal de audio de la cuerda por medio del micrófono. Dicha señal será procesada, pasando primero por un conversor análogo – digital, luego se realiza la Transformada de Fourier de la señal para determinar la frecuencia fundamental de onda, la cual se compara con una base de datos establecida bajo las frecuencias de la escala temperada, luego se observará en la pantalla un mensaje y el valor de frecuencia que tiene la señal ingresada para realizar su ajuste.

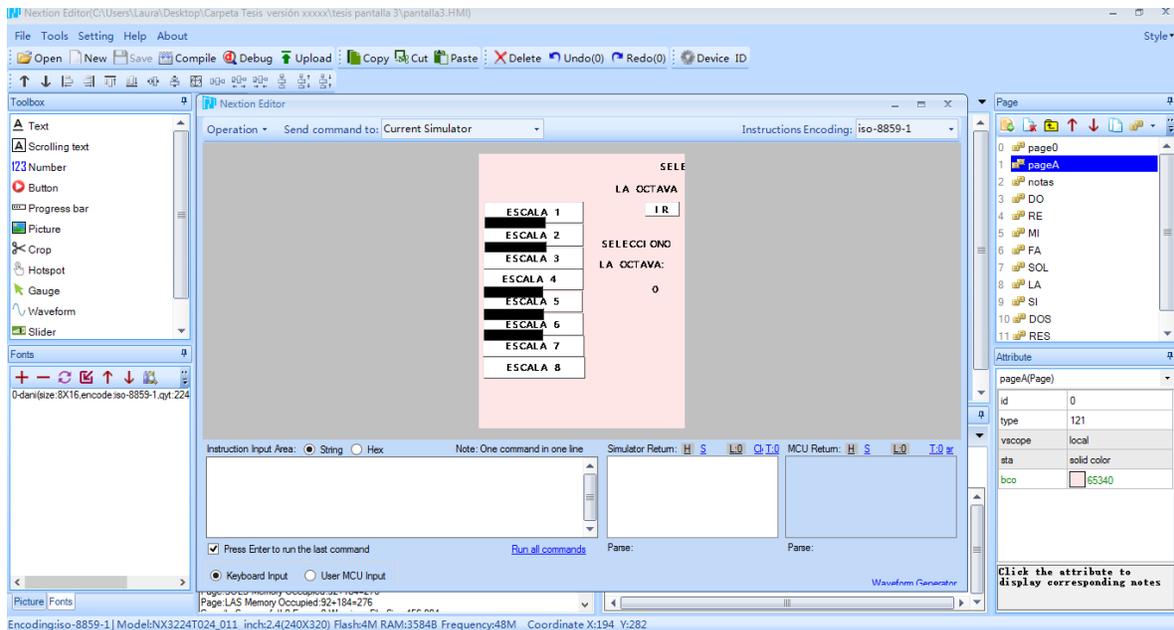


Figura 5.4 Interfaz gráfica de usuario software Nextion

CONSIDERACIONES PARA LA CREACION DEL PROYECTO

La tecnología utilizada es ARDUINO MEGA and NEXTION Version: 4.0.0.0 © 2002 a. All rights reserved. Ambos software son herramientas diseñadas para proveer al usuario la solución más fácil posible para el desarrollo de aplicaciones en pro del desempeño o control. Este IDE altamente avanzado cuenta con librería para hardware, una documentación comprensiva y varios ejemplos listos para ser usados, lo que permite una programación rápida de los microcontroladores.

La creación de aplicaciones en ARDUINO- NEXTION es muy fácil e intuitiva. El - New Project - le permite establecer las características del programa como el nombre, el tipo de integrado, y los bits de control. Este programa le permite distribuir sus proyectos en tantas carpetas como usted desee.

El proyecto contiene la siguiente información: nombre del proyecto y una descripción opcional, el tipo de lista de los archivos fuente del proyecto.

5.1.3 FUNCIONAMIENTO DEL PROGRAMA

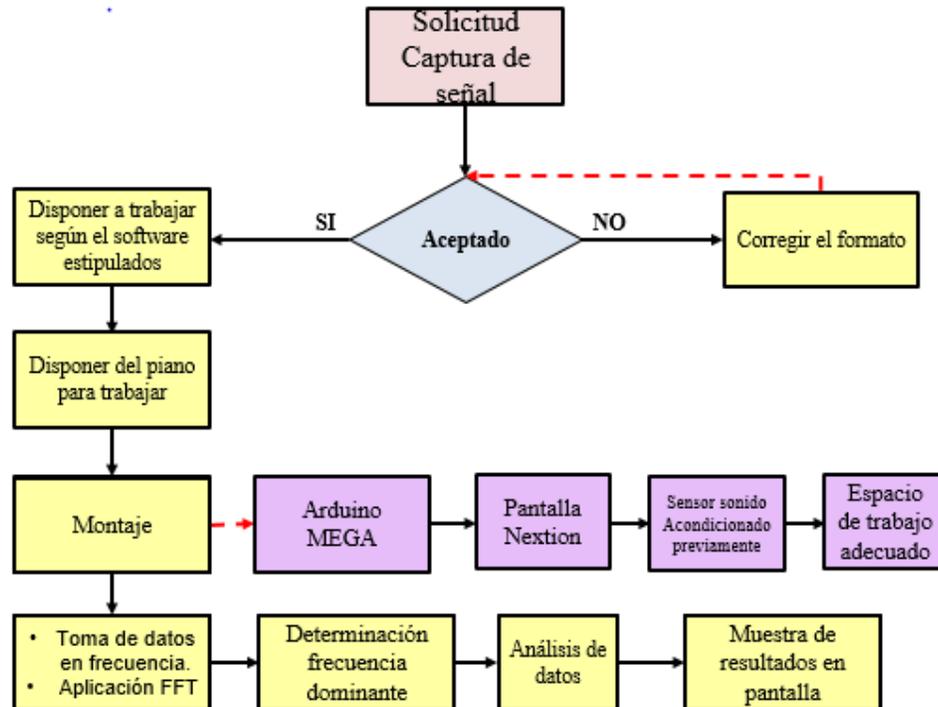


Figura 5.5 Diagrama de flujo Adquisición de datos de programa

De acuerdo al análisis de las características necesarias para el diseño del afinador y su importancia al entender el desarrollo del proyecto, se hace uso de dos software principales: Arduino – Nextion ya que son de fácil uso, amigables para el usuario y además cuentan con herramientas para simulación, siendo posible de esta manera realizar pruebas que ayudan en la programación y verificación del procedimiento que realiza el dispositivo.

Este software tiene la ventaja de que incluye ya varias funciones desarrolladas, con las cuales se puede hacer tanto programas básicos como programas más complejos, además brinda una ayuda muy completa y de fácil comprensión. Por ser un entorno que utiliza lenguaje Basic es de fácil programación.

FRECUENCIA Y NÚMERO DE MUESTRAS

El ADC del Arduino trabaja entre 0 cinco voltios con una resolución de 4mV, es decir, si lee un 0V escribe un valor entero 0, y si lee 5V escribe 1024. Cuando no se está tocando ninguna cuerda, el ADC está leyendo continuamente valores próximos a 512 con una oscilación de +/- 2 voltios. Se considera que se está tocando la cuerda indicada (por medio del LED), si la lectura del ADC es mayor que 512+100. Si esto ocurre, el ADC toma un número de muestras determinado que se almacenan en un vector para poder hacerles la transformada de Fourier.

El valor “100” en “512+100” es orientativo, se necesita que sea lo suficientemente alto como para evitar que empiece a muestrear por algún pico transitorio de tensión debido a ruidos, pero no tan alto como para que el valor máximo de la señal al tocar una cuerda no sea capaz de superarlo, dando como resultado que en ningún tiempo se tomarían muestras.

El número de muestras a tomar lo determina el algoritmo FFT (transformada rápida de Fourier) que calcula la transformada discreta de Fourier (DFT), ya que tiene algunas limitaciones como que el número de muestras debe ser igual a una potencia de dos. La mayoría de los algoritmos permiten la transformación de 512, 1024, 2048 o 4096 muestras.

En este caso se usa una librería de arduino llamada “Arduino FFT Library”, que solo permite coger 256 muestras, lo que conlleva una gran limitación. La frecuencia de muestreo la determinan la frecuencia del sonido a adquirir y el número de muestras que se tomen.

Por un lado, según el teorema de muestreo de Nyquist- Shannon para poder adquirir toda la información de una señal periódica, es necesario muestrear al menos al doble de la frecuencia de dicha señal. Si no se satisface este criterio se produce un fenómeno llamado aliasing, por el que, debido a la baja frecuencia de muestreo la señal se puede confundir con una de frecuencia más baja, como se observa en la Figura 5.5 respecto al fenómeno de aliasing

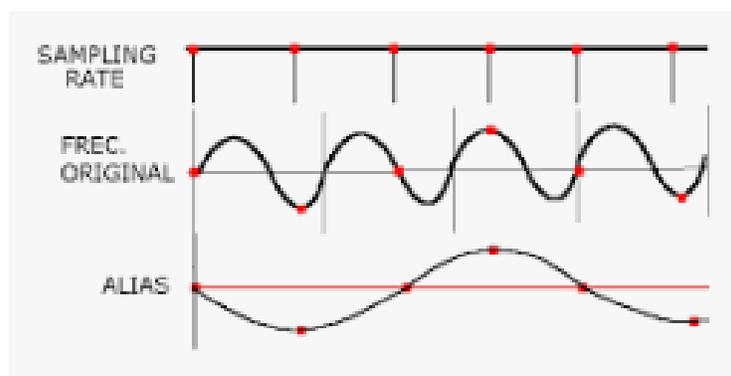


Figura 5.6 Fenómeno de aliasing

Por otro lado, la resolución de la transformada de Fourier y el rango de frecuencias cubierto dependen directamente de la frecuencia de muestreo y del número de muestras y la resolución de la transformada es la separación en hertzios entre cada dato de la misma. Se determina entonces que si la frecuencia de muestreo es mucho mayor que el número de muestras, al captar bajas frecuencias se comete un error porcentual muy alto.

Haciendo un análisis rápido, se puede ver que si la frecuencia de muestreo es por ejemplo 4096 muestras/segundo, y el número de muestras 128, la resolución sería de 32 Hz, (es decir, primer valor obtenido al realizar la transformada correspondería a 0 Hz, el segundo a 32Hz , el tercero a 64 Hz, etc..) teniendo en cuenta que la frecuencia más alta del piano (de forma ideal) es alrededor de 7100 Hz, se cometería un error de hasta el 5% en cada medida, error que iría creciendo con el resto de cuerdas ya que vibran a menor frecuencia. Entonces, para cometer el menor error posible, hay que muestrear a la frecuencia mínima que cumpla el teorema de Nyquist.

CAPITULO 6. DISEÑO EN 3D, FABRICACIÓN DEL CONTENEDOR

Se estudian los componentes necesarios adecuados para crear el contenedor o caja en el cual estará el equipo para el usuario, dispuesto de manera cómoda y accesible. Se ubica una caja contenedora en 3D, diseñada en el software Design Mechanical Spark mediante el cual se construyen y ubican los compartimientos para ubicar los componentes del afinador alternativo.

Las paredes de las piezas tienen dos funciones, por un lado, evitan que el sensor se intenta aflojar y por otro lado, sirven para sujetar los componentes y sacarlos fuera, con el fin de evitar tener que mecanizarla o aplicarle pegamentos que estropearían su acabado. La mayoría de las piezas van atornilladas y algunas (módulo amplificador de sonido), que no tienen espacio para hacerles taladros se van a sujetar en una mini protoboard.

Existen unas dimensiones críticas para el montaje del sistema, la primera en la separación entre la pantalla y el módulo sensor, para que el afinador no obstaculice, no puede sobrepasar el saliente inferior de la placa, y por estética, tampoco debería sobresalir por la parte superior, esto limita el largo de las piezas a 25 centímetros como máximo.

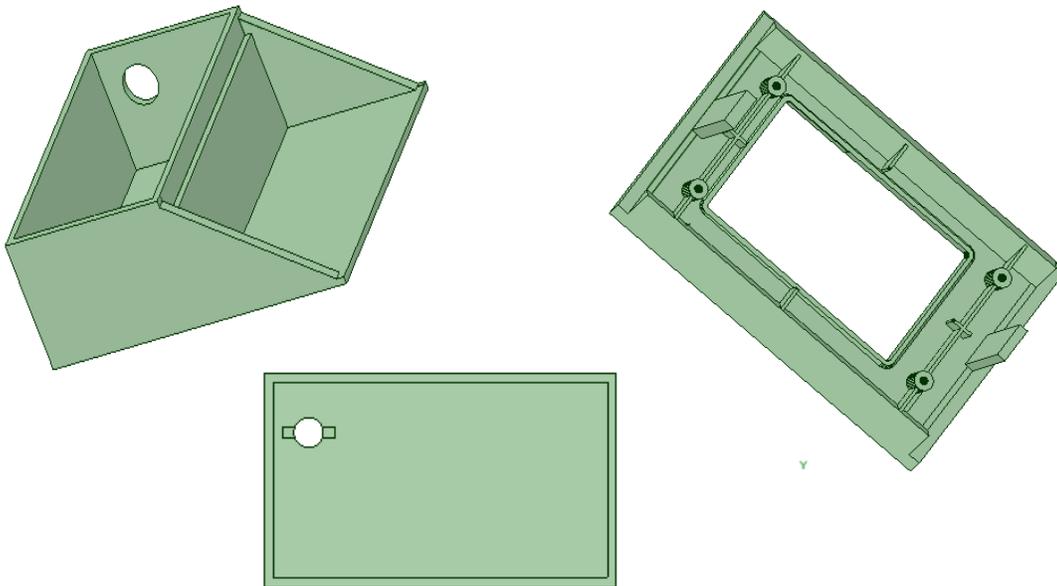
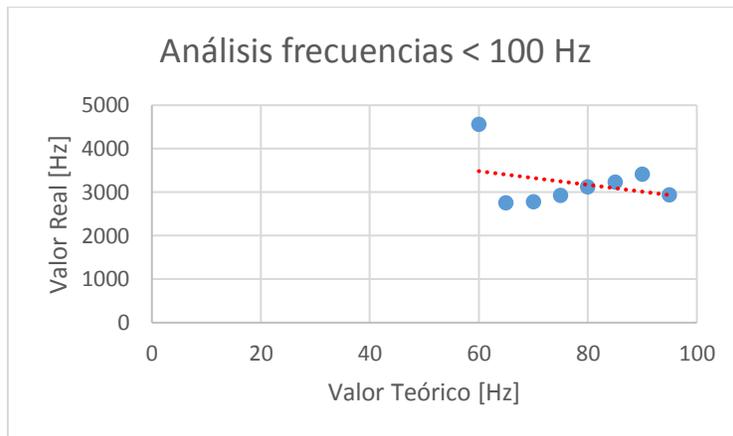


Figura 6.1 Diseño del contenedor en 3D software Design Mechanical Spark

6.1.1 PRUEBAS Y RESULTADOS

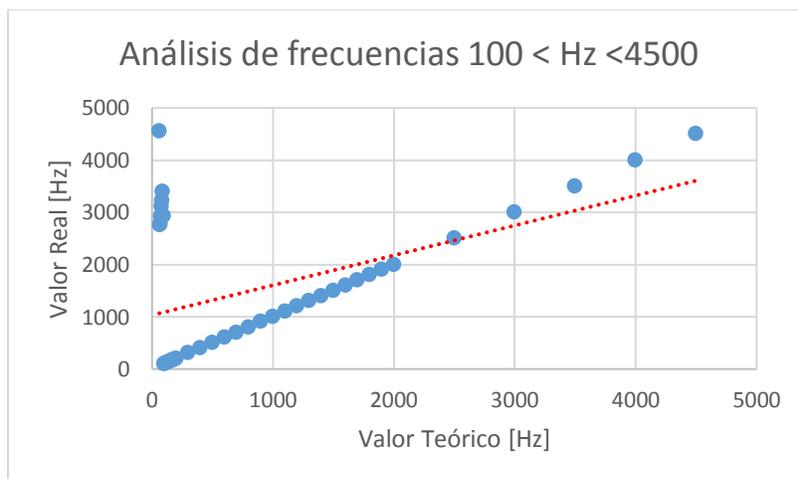
Se realiza una prueba con las frecuencias ideales del temperamento igual obtenidas por medio de un osciloscopio, la cual fue capturada por el sensor. Se obtuvieron los siguientes resultados:

- Para las frecuencias inferiores a 100Hz se encontró una gran desviación en la comparación entre el valor real y el valor teórico

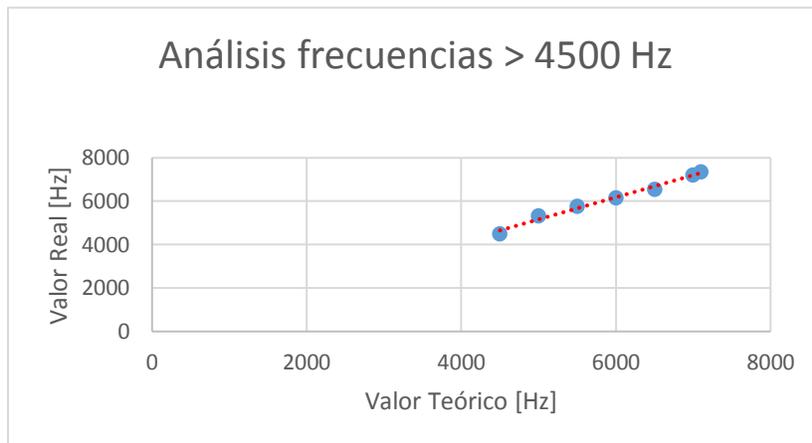


Gráfica 1: análisis de frecuencias < 100 Hz

- Para las demás frecuencias se puede ver que los valores obtenidos se acercan más a los valores teóricos



Gráfica 2: análisis de frecuencias entre 100 y 4500 Hz



Gráfica 3: análisis de frecuencias > 4500 Hz

CURVA DE DESVIACION DE RAILSBACK

Ora Railsback fue un investigador que hizo un experimento con los afinadores de los pianos, éste solicitó a los mejores afinadores que afinaran un piano, luego realizó un muestreo donde llegó a la conclusión de que los extremos del piano se dilataban durante su afinación, es decir que los afinadores cambiaban los valores de las frecuencias en las bajas y las altas para evitar el proceso de batimiento, y la inarmonía del piano.

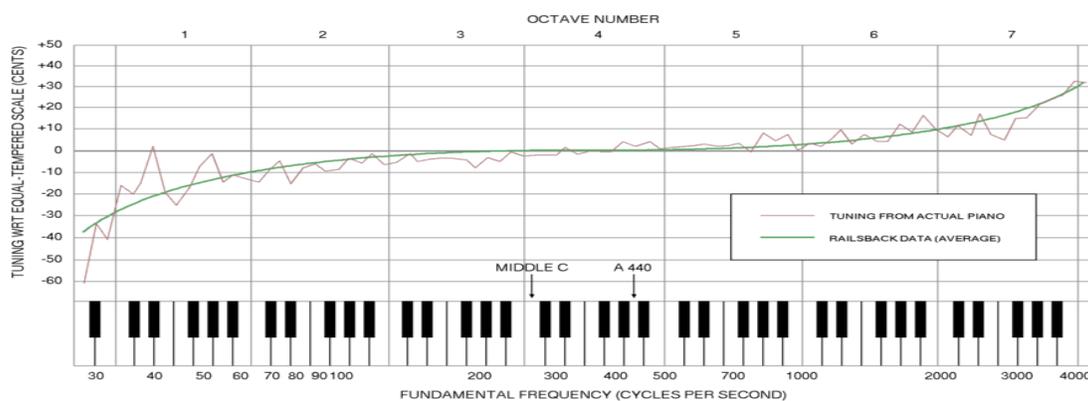
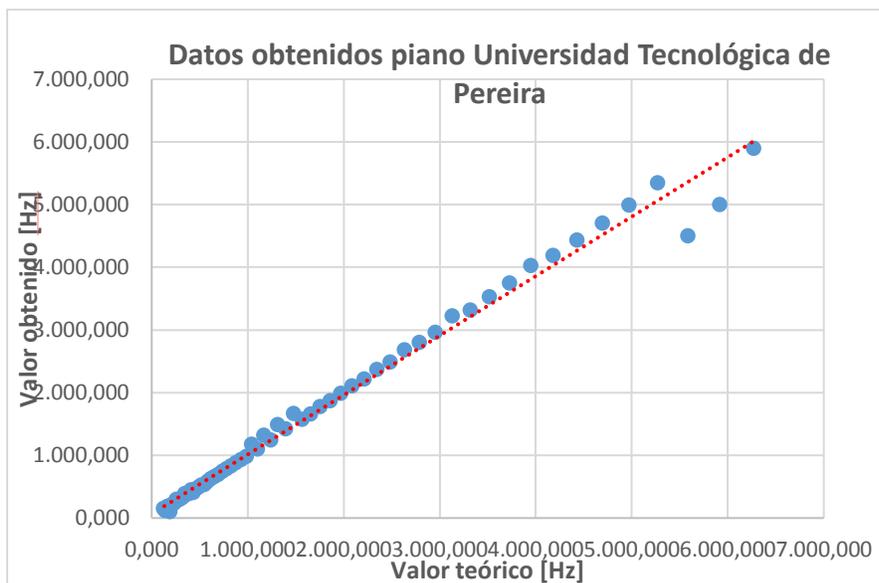


Figura 6.2 Curva de desviación de Railsback

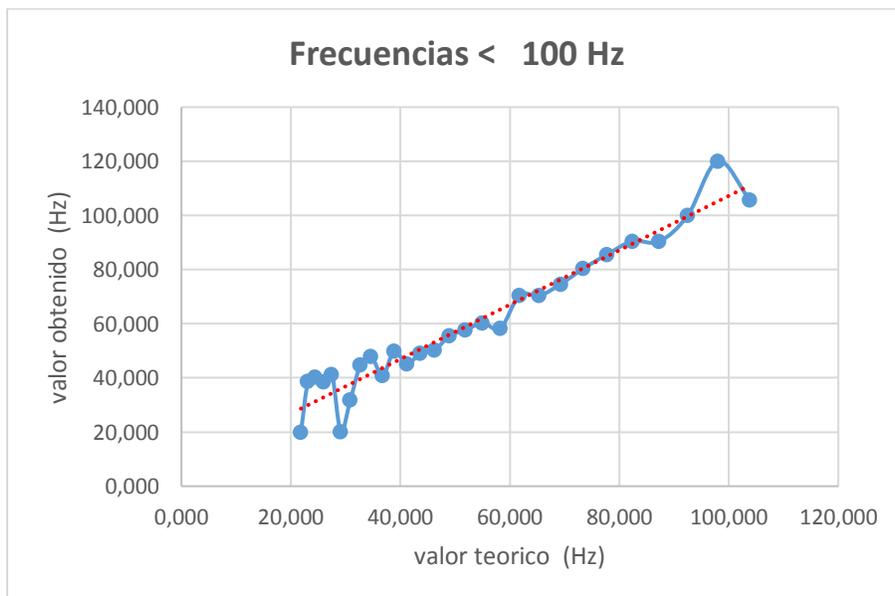
Resultados piano

Gracias a los resultados de la curva de desviación de Railsback los científicos descubrieron que los 24 cents que sobraban anteriormente se debían “repartir” equitativamente entre las frecuencias menores de 100 Hz.

En las siguientes gráficas se observa el resultado obtenido luego de realizar el estiramiento de las frecuencias bajas y realizar el ejercicio con un piano, como objeto de estudio de la universidad tecnológica de Pereira:



Gráfica 4. Datos obtenidos usando piano UTP como objeto de estudio



Gráfica 5. Frecuencias inferiores a 100 [Hz]

TABLAS DE RESULTADO

TABLA 1: ANÁLISIS DE DATOS OBTENIDOS CON SEÑAL EMITIDA POR EL GENERADOR DE FRECUENCIA S CAPTURA DE LA SEÑAL EN ARDUINO									
FRECUENCIA GENERADOR	FRECUENCIA OBTENIDA	FRECUENCIA GENERADOR	FRECUENCIA OBTENIDA	FRECUENCIA GENERADOR	FRECUENCIA OBTENIDA	FRECUENCIA GENERADOR	FRECUENCIA OBTENIDA	FRECUENCIA GENERADOR	FRECUENCIA OBTENIDA
60	4554	120	118	500	500	1500	1500	4500	4500
65	2752	130	130	600	600	1600	1600	5000	5532
70	2775	140	141	700	700	1700	1700	5500	5776
75	2921	160	158	800	801	1800	1800	6000	6620
80	3114	170	170	900	906	1900	1902	6500	6805
85	3228	180	180	1000	1000	2000	2000	7000	7220
90	3400	190	192	1100	1101	2500	2503	7100	7348
95	2926	200	202	1200	1200	3000	3000		
100	101	300	305	1300	1300	3500	3501		
110	104	400	399	1400	1400	4000	4000		

TABLA 2 DATOS OBTENIDOS PIANO DE ESTUDIO UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA																
NOTA	ESCALA 1		ESCALA 2		ESCALA 3		ESCALA 4		ESCALA 5		ESCALA 6		ESCALA 7		ESCALA 8	
	DATO TEORICO	DATO REAL														
DO	32,70	44,76	61,74	70,49	116,00	152,86	220,00	223,62	415,30	450,00	783,99	787,50	1.479,98	1.672,00	2.793,83	2.803,50
DO#	34,65	47,92	65,41	70,38	123,47	126,20	233,08	231,91	440,00	412,00	830,61	832,37	1.567,98	1.575,00	2.959,96	2.963,94
RE	36,75	40,89	69,30	74,66	130,81	157,13	246,94	257,75	466,00	470,00	880,00	882,15	1.661,22	1.664,56	3.135,96	3.228,54
RE#	38,89	49,90	73,42	80,38	138,59	149,40	261,63	299,98	493,88	495,91	932,33	934,70	1.760,00	1.780,45	3.322,44	3.320,51
fa	41,20	45,09	77,78	85,60	146,83	121,63	277,18	288,26	523,25	525,00	987,77	986,80	1.864,66	1.868,94	3.520,00	3.527,45
fa#	43,65	49,15	82,41	90,50	155,56	138,35	293,66	295,30	554,37	531,45	1.046,50	1.182,52	1.975,53	1.990,80	3.729,31	3.749,17
sol	46,25	50,24	87,31	90,40	164,81	176,86	311,13	315,90	587,33	588,00	1.108,73	1.102,19	2.093,00	2.106,39	3.951,07	4.028,60
sol#	49,00	55,60	92,50	100,05	174,61	184,69	329,63	331,00	622,25	625,10	1.174,66	1.325,07	2.217,46	2.219,56	4.186,01	4.191,56
la	51,91	57,65	98,00	120,10	185,00	177,00	349,23	394,45	659,26	658,20	1.244,51	1.247,58	2.349,32	2.370,80	4.434,92	4.439,43
la#	55,00	60,30	103,83	105,70	196,00	103,50	369,99	386,52	698,46	700,00	1.318,51	1.491,48	2.489,02	2.489,14	4.698,64	4.703,56
si	58,27	58,29	110,00	114,00	207,65	209,15	392,00	393,45	739,99	742,90	1.396,91	1.422,00	2.637,02	2.681,40	4.978,03	4.990,65

TABLA 3 PORCENTAJE DE ERROR

NOTA	ESCALA 1			ESCALA 2			ESCALA 3			ESCALA 4			ESCALA 5			ESCALA 6			ESCALA 7			ESCALA 8		
	DATO TEORICO	DATO REAL	% ERROR	DATO TEORICO	DATO REAL	% ERROR	DATO TEORICO	DATO REAL	% ERROR	DATO TEORICO	DATO REAL	% ERROR	DATO TEORICO	DATO REAL	% ERROR	DATO TEORICO	DATO REAL	% ERROR	DATO TEORICO	DATO REAL	%ERROR	DATO TEORICO	DATO REAL	%ERROR
DO	32,70	44,76	-0,27	61,74	70,49	-0,12	116,00	152,86	-0,24	220,00	223,62	-0,02	415,30	450,00	-0,08	783,99	787,50	0,00	1.479,98	1.672,00	-0,11	2.793,83	2.803,50	-0,003
DO#	34,65	47,92	-0,28	65,41	70,38	-0,07	123,47	126,20	-0,02	233,08	231,91	0,01	440,00	412,00	0,07	830,61	832,37	0,00	1.567,98	1.575,00	0,00	2.959,96	2.963,94	-0,001
RE	36,75	40,89	-0,10	69,30	74,66	-0,07	130,81	157,13	-0,17	246,94	257,75	-0,04	466,00	470,00	-0,01	880,00	882,15	0,00	1.661,22	1.664,56	0,00	3.135,96	3.228,54	-0,029
RE#	38,89	49,90	-0,22	73,42	80,38	-0,09	138,59	149,40	-0,07	261,63	299,98	-0,13	493,88	495,91	0,00	932,33	934,70	0,00	1.760,00	1.780,45	-0,01	3.322,44	3.320,51	0,001
fa	41,20	45,09	-0,09	77,78	85,60	-0,09	146,83	121,63	0,21	277,18	288,26	-0,04	523,25	525,00	0,00	987,77	986,80	0,00	1.864,66	1.868,94	0,00	3.520,00	3.527,45	-0,002
fa#	43,65	49,15	-0,11	82,41	90,50	-0,09	155,56	138,35	0,12	293,66	295,30	-0,01	554,37	531,45	0,04	1.046,50	1.182,52	-0,12	1.975,53	1.990,80	-0,01	3.729,31	3.749,17	-0,005
sol	46,25	50,24	-0,08	87,31	90,40	-0,03	164,81	176,86	-0,07	311,13	315,90	-0,02	587,33	588,00	0,00	1.108,73	1.102,19	0,01	2.093,00	2.106,39	-0,01	3.951,07	4.028,60	-0,019
sol#	49,00	55,60	-0,12	92,50	100,05	-0,08	174,61	184,69	-0,05	329,63	331,00	0,00	622,25	625,10	0,00	1.174,66	1.325,07	-0,11	2.217,46	2.219,56	0,00	4.186,01	4.191,56	-0,001
la	51,91	57,65	-0,10	98,00	120,10	-0,18	185,00	177,00	0,05	349,23	394,45	-0,11	659,26	658,20	0,00	1.244,51	1.247,58	0,00	2.349,32	2.370,80	-0,01	4.434,92	4.439,43	-0,001
la#	55,00	60,30	-0,09	103,83	105,70	-0,02	196,00	103,50	0,89	369,99	386,52	-0,04	698,46	700,00	0,00	1.318,51	1.491,48	-0,12	2.489,02	2.489,14	0,00	4.698,64	4.703,56	-0,001
si	58,27	58,29	0,00	110,00	114,00	-0,04	207,65	209,15	-0,01	392,00	393,45	0,00	739,99	742,90	0,00	1.396,91	1.422,00	-0,02	2.637,02	2.681,40	-0,02	4.978,03	4.990,65	-0,003

CONCLUSIONES Y ANEXOS

- Con la ayuda de la transformada de Fourier se pudo realizar un programa en Arduino que ayudara con el ajuste de las frecuencias de un piano teniendo en cuenta la escala de afinación de temperamento igual.
- “Railsback” decía que la teoría de las frecuencias de un piano es errónea, porque ésta ignora la inarmonía de las cuerdas, según él, un afinador debe reducir la velocidad del batimiento de las cuerdas, por lo que se debe distribuir 24 cents entre las frecuencias graves para conseguir una afinación uniforme; como resultado de lo anterior se llega a la conclusión de que para evitar el desfase de las frecuencias menores a 100 Hz debe distribuir dicho de manera uniforme.
- Se realizaron las respectivas correcciones a la escala de temperamento igual para evitar el fenómeno de batimiento.
- A partir de pruebas realizadas con un piano digital, se corroboró la medida de las frecuencias obtenidas para verificar el índice de error obtenido dentro del rango permitido de dichas correcciones.
- El desarrollo de sistemas basados en los módulos de Arduino, es bastante usado en el mercado; las rutinas de comunicación se acoplan fácilmente, lo cual permite verificar el intercambio y procesamiento de las señales

RECOMENDACIONES

- Debido a la poca capacidad de memoria de Arduino UNO sólo se puede realizar una FFT de máximo 256 puntos, esto quiere decir que la resolución que se puede obtener sobre todo para señal con alta frecuencia es muy baja, por lo que se recomienda utilizar un integrado con mayor capacidad como por ejemplo los de la familia Arduino Mega, ya que con mayor espacio de memoria disponible es posible tomar un número mayor de muestra de la señal análoga lo que nos da una mejor resolución en el resultado del cálculo de la frecuencia.
- Es recomendable trabajar a 9600 baudios como velocidad de comunicación, de lo contrario causa dificultades al momento de la transmisión y recepción de los datos.

GLOSARIO

Afinar: Es la acción de poner en tono justo los instrumentos musicales de acuerdo a un diapasón o ajustarlos bien unos con otros.

Altura: La altura del sonido depende de su frecuencia, es decir, del número de vibraciones por segundo del cuerpo vibrante. Se entiende por altura de un sonido su calidad de agudo ("alto") o grave ("bajo").

Armónicos: Combinación de notas que se emiten simultáneamente.

Intensidad: La cualidad que permite distinguir entre sonidos fuertes o débiles.

Intervalos musicales: Es la diferencia de tono entre dos notas.

Octava: Es la repetición de un sonido con una cuerda con la mitad de largura.

Resonancia: Cuando dos cuerpos tienen frecuencias iguales y uno de ellos está en vibración, el otro sin ser tocado.

Escala: es el orden en el que la música maneja las frecuencias, las cuales tienen una separación constante.

Alteraciones: Es cuando se le sube medio tono a la nota natural.

Escala cromática: Escala que separa las frecuencias con las alteraciones.

Escala diatónica: Escala que separa las frecuencias sin ningún tipo de alteraciones.

Fundamental: Es la vibración de un armónico.

Grado: Corresponde al orden de las octavas musicales siendo el primer grado la escala número 1.

Tonalidad: Frecuencia base en la cual se encuentra una obra.

BIBLIOGRAFIA

- [1].b. bank. physics-based sound synthesis of the piano. master's thesis, budapest university of technology and economics, department of measurement and information systems, budapest, hungary, may 2000
- [2].juan jose burred, the acoustics of the piano, conservatory of music arturo soria, madrid, revised version, september 2004.
- [3].antoine chaigne, juliette chabassier, nicolas burban. acoustics of pianos: physical modeling, simulations and experiments. smac 2013 - stockholm music acoustics conference 2013, jul 2013, stockholm, sweden. 2013.
- [4].nikki etchenique, samantha r. collin, and thomas r. moorea, 32789coupling of transverse and longitudinal waves in piano strings, department of physics, rollins college, winter park, florida.
- [5].vesa v'alm'aki, jyri pakarinen, cumhur erkut and matti karjalainen, discretetime modelling of musical instruments, laboratory of acoustics and audio signal processing, helsinki university of technology, espoo, finland.
- [6].andre jucovsky bianchi; marcelo queiroz; real time digital audio processing using arduino, university of s'ao paulo, brazil
- [7].el afinador de pianos, din'amica de sistemas no lineales en la armon'ia, ac'ustica y temperamentos - afinaci'on de pianos, barcelona, 2005.
- [8].mcgraw-hill education, university physics, wolfgang bauer & gory d. westfall, 2011.
- [9].juan sebasti'an guevara san'ın, teor'ia de la m'usica, 2010
- [10]. m'onica gonz'alez, la gu'ia <https://fisica.laguia2000.com/acustica/la-fisica-acustica> ,28 enero 2011.
- [11]. *programa d'inform'atica educativa del departament d'ensenyament de la generalitat de catalunya , la caixa de la m'usica,*
http://www.xtec.cat/centres/a8019411/caixa/index_es.htm , 2002
- [12]. hugo landolfi, como afinar un piano de pared, escuela de tecnolog'ia pian'istica de buenos aires, 1997
- [13]. carlos platero , introducci'on al procesamiento digital de se'ales, universidad polit'ecnica de madrid.

- [14]. helena dolores ibarra ruiz, diseño e implementacion de un prototipo de un afinador digital de instrumentos musicales con dspic30f3014 , escuela politécnica del ejército ecuador, 2007.
- [15]. francisco j.. garcía castillo, características del sonido, , <http://www.ieesa.com/universidades/tesis01/capt4b.pdf> .
- [16]. tipler y mosca, 6a edición, capítulo 15, 17/04/2012
- [17]. maria cecilia tomasini fundamento matemático de la escala musical y sus aices pitagóricas, universidad de palermo.
- [18]. gaston schelotto dowek. medida de armónicos en clase i para redes eléctricas de frecuencia variable, 2004.
- [19]. pablo alvarado moya, algoritmo de la transformada rápida de fourier, instituto tecnológico de costa rica, 2017
- [20]. <http://www.ni.com/support/esa/cvi/analysis/analy3.htm> (Consultado Agosto 2018).
- [21]. <http://www.historiadelasinfonia.es/conceptos-basicos/musica/la-escala-temperada/> (Consultado Agosto 2018)
- [22]. [22]. <https://moviltronics.com.co/sensores/182-modulo-sensor-de-sonido> (Consultado Marzo 2018).
- [23]. Medida de armónicos en Clase I para redes eléctricas de frecuencia variable.pdf publicado en 2004, Gaston Schelotto Dowek. (Consultado Enero 2019)