



Instituto Tecnológico
de Buenos Aires

TESIS DE GRADO EN INGENIERÍA
ELECTRÓNICA

PEDAL WAH WAH INALÁMBRICO

Andrés Bersier - 52.441
Gonzalo Rizzo - 53.339
Pablo Gardella - 53.370
Mauro Padín - 53.387

2016

Índice

Glosario de términos	3
1. Antecedentes	5
2. Justificación del proyecto	6
3. Objetivos	6
3.1. Finalidad del proyecto	6
4. Equipo de trabajo	7
5. Definición del producto	8
5.1. Encuesta	8
5.2. Requerimientos	15
5.3. Especificaciones funcionales y de diseño	16
5.3.1. Especificaciones del Hardware	16
5.3.2. Especificaciones del Software	17
5.4. Casa de calidad	18
6. Análisis de factibilidad	19
6.1. Factibilidad tecnológica	19
6.1.1. Propuesta de alternativas de diseño	19
6.1.2. Análisis modal de fallas y efectos (DFMEA)	25
6.2. Factibilidad de tiempos	28
6.2.1. Planificación del proyecto (PERT)	28
6.2.2. Simulación de Montecarlo	31
6.2.3. Programación	31
6.3. Factibilidad económica	33
6.3.1. Relevamiento de la competencia	33
6.3.2. Ventajas competitivas	33
6.3.3. Detalle de costos	35
6.3.4. Modelo de negocios	37
6.3.5. Flujo de fondos	38
6.4. Factibilidad legal y responsabilidad civil	40
6.4.1. Requisitos de productos eléctricos (92/98)	40
6.4.2. Compatibilidad Electromagnética	41
7. Ingeniería de detalle	42
7.1. Fonética	42
7.2. Hardware	45
7.2.1. Diagramas en bloques	45
7.2.2. Detalles de diseño	47
7.2.3. Plan de prueba de cada módulo	57
7.3. Software	58
7.3.1. Diagramas de estados y flujograma	58
7.3.2. Plan de prueba de módulos y de depuración de software	62
8. Construcción del prototipo	63
8.1. Definición de los módulos	63
8.2. Diseño de los circuitos impresos	63
8.3. Diseño mecánico	68
8.4. Detalles de construcción y precauciones especiales de montaje	72

9. Validación del prototipo	75
9.1. Validación del hardware	75
9.1.1. Plan y protocolos especiales de medición	75
9.1.2. Mediciones	75
9.1.3. Resultados	76
9.2. Validación del software	77
10. Estudios de confiabilidad	78
10.1. Hardware	78
10.2. Software	79
10.2.1. Predicción	79
10.2.2. Estimación	80
10.3. Garantía	81
11. Conclusiones	82
11.1. Objetivos alcanzados	82
11.2. Fallos o recomendaciones para futuros diseños	83
Anexo de seguridad	85
Anexo financiero	87
Anexo técnico	96
Bibliografía	99

Glosario de términos

Bluetooth	: Es un estandar de tecnología que permite el intercambio de información por medios inalámbricos en cortas distancias.
DSP	: Es un Procesador Digital de Señales (DSP, por sus siglas en inglés) dedicado al tratamiento digital de señales. Puede realizar funciones que reemplacen a los filtros analógicos e incluso funciones difíciles de alcanzar en dicho dominio.
Error de cuantización	: Es un error que se produce cuando se convierte una señal analógica en un sistema digital.
FPGA	: Sus siglas en inglés significan Field-Programmable Gate Array. Es un circuito integrado que puede ser configurado por el usuario para realizar determinado procesamiento digital de los datos.
Fuzz	: Es un efecto usado para alterar el sonido amplificado de un instrumento musical, generalmente es usado en guitarras eléctricas.
GPIO	: Sus siglas en inglés significan General Purpose Input-Output. Son puertos de un microcontrolador que pueden ser usados como entradas o salidas de datos.
IDE	: Sus siglas en inglés significan Integrated Development Environment. Es un software que contiene las herramientas básicas que los diseñadores necesitan para escribir y evaluar sus códigos.
IP	: Son las siglas de International Protection. Es un sistema de clasificación dado por la normal internacional IEC 529 que define un estandar para la eficacia de los equipos electrónicos frente a su exposición a cuerpos extraños como herramientas, dedos, polvo y el nivel de exposición al agua que tolera el equipo.
OAA	: Es el Organismo Argentino de Acreditación, ente encargado de la certificación legal en materia de seguridad de productos comerciales.
PCB	: Plaqueta de circuito impreso que sirve para brindar un soporte mecánico e interconectar componentes eléctricos.
PERT	: Es acrónimo de Project Evaluation and Review Technique. Es una herramienta estadística usada en la dirección de proyectos para analizar y representar las tareas y su duración.
PERT	: Es acrónimo de Project Evaluation and Review Technique. Es una herramienta estadística usada en la dirección de proyectos para analizar y representar las tareas y su duración.
Sección sagital	: Los planos o secciones sagitales son en anatomía aquellos planos, perpendiculares al suelo y en ángulo recto con los planos frontales, que dividen al cuerpo en mitades izquierda y derecha.
SPI	: Es la sigla en inglés de Serial Peripheral Interface. Es un protocolo de comunicación serie y sincrónico usado para comunicar 2 dispositivos en una distancia corta, generalmente se lo usa en microcontroladores.
THD	: Es la distorsión total armónica (THD, por sus siglas en inglés). Es una medida del contenido de armónicos presentes en una señal. Se define como la suma de las potencias de todos los armónicos dividido la potencia de la frecuencia fundamental.

Transistores bipolares	: Son componentes electrónicos utilizados para conseguir amplificación de señales eléctricas.
TREMA	: Es la Tasa de Rendimiento Mínima Aceptable. Es la rentabilidad mínima que se le exigirá a un proyecto de inversión de tal manera que permita cubrir la totalidad de la inversión inicial, los egresos, los intereses, los impuestos y la rentabilidad que el inversionista exige a su propio capital invertido.
True By Pass	: Es una característica de los pedales que consiste en que ante determinado estímulo del usuario como puede ser presionar un botón, la señal de entrada vaya directamente a la salida del pedal. Es decir, se elimina el efecto de filtrado sobre la señal de entrada cuando esta característica está activada.
UART	: Son las siglas en inglés de Universal Asynchronous Receiver-Transmitter. Es un protocolo que convierte información digital en un formato asincrónico para comunicación serie, generalmente encapsulado entre bits de comienzo y finalización.
VAN	: Es un procedimiento que permite calcular el valor presente de un determinado número de flujos de caja futuros, originados por una inversión. Es acrónimo de Valor Actual Neto.
Wah Wah	: Es un tipo de efecto para guitarras en forma de pedal que altera el tono de la nota generando un efecto distintivo que imita la voz humana.
Wearable	: Son dispositivos electrónicos miniaturizados y diseñados para ser usados como accesorios de moda.
Wi-Fi	: Es una tecnología que permite a dispositivos electrónicos conectarse entre sí a través de una red inalámbrica.

1. Antecedentes

Los primeros Wah Wahs tuvieron su auge en los años 60/70 y estaban contruidos con componentes discretos como transistores bipolares , inductores, resistores y capacitores. Si bien el avance de la tecnología contemporánea desde entonces permitió la construcción de pedales digitales más modernos, estos no fueron aceptados por el mercado debido a que sus primeras versiones tenían errores de cuantización del sonido debido a limitaciones tecnológicas de la época. No obstante eso, cuando se pudieron construir pedales Wah Wahs digitales con suficiente resolución como para que no sea perceptible el procesamiento digital de la señal, el mercado no los aceptó porque estos ya habían sido estigmatizados por sus antecesores.

Hoy en día hay Wah Wahs digitales que han dejado de lado su forma original de pedal, como las que pueden observarse en las figuras 1a y 1b e inclusive se los puede encontrar como aplicaciones para celulares, dentro de pedaleras más sofisticadas, etc. Sin embargo, por más que no haya diferencias en cuanto a la calidad del sonido resultante entre las versiones analógicas y digitales el mercado contemporáneo tiene una marcada y abrumadora inclinación hacia los pedales analógicos. Esta tendencia subjetiva del mercado no está siendo explotada y es la motivación del proyecto.



(a) Pedal Vox V847



(b) Pedal Cry-Baby Dunlop GCB95

Figura 1: Pedales Wah Wah comerciales.

2. Justificación del proyecto

La propuesta que se presenta consiste en la fabricación de un Wah Wah analógico para que sea aceptado por el mercado, pero que cuente con todas las ventajas de un control digital. Para hacer esto se propone desarrollar un producto que consista en un filtro analógico controlado mediante un **potenciómetro digital** a partir de los movimientos sensados por un acelerómetro. Esto permite romper con el concepto tradicional de la pedalera ya que al ser digital se pueden usar acelerómetros con interfaces Bluetooth para que su control, en vez de ser a partir de la posición angular de un pedal, que sea a partir de la posición del pie sin pedal alguno, o bien a partir de la inclinación de la guitarra, inclusive la escalabilidad del proyecto permite a futuro considerar interfaces biométricas que interactúen con el Wah Wah para que este sea accionado por el movimiento de una pierna o incluso la cabeza a través de un wearable.

Este producto híbrido que cuenta con el filtrado analógico de los pedales originales, pero además tiene las prestaciones de los pedales digitales permitiría innovar en un mercado donde la innovación es difícilmente aceptada, y la rentabilidad que este producto puede alcanzar es sumamente interesante.

Para mencionar ejemplos concretos de Wah Wahs comerciales se pueden citar los casos de *Vox* y *Cry-Baby*, dos marcas líderes en el mercado mundial. Por ejemplo, el Wah Wah de *Vox* modelo “V847” que se ilustró en la figura 1a se valúa en U\$S 85 dentro de los Estados Unidos, mientras que el mismo pedal en Argentina se consigue por cifras que rondan los U\$S 200 en locales oficiales. En cuanto a *Cry-Baby*, el pedal “Dunlop GCB95” de la figura 1b se valúa en Eupora por aproximadamente € 115, mientras que en el mercado local su precio oficial está alrededor de los U\$S 260.

Ahora bien, cuando se hace una proyección para saber cuánto puede llegar a ser el costo de producción en Argentina de un pedal como el propuesto, se estima que el costo de producción de un Wah Wah es de aproximadamente U\$S 78 (ver 6.3), lo cual otorga una ventaja competitiva interesante desde el punto de vista comercial por el precio, y también por el lado tecnológico ya que el producto que se está ofreciendo es inherentemente novedoso frente a sus competidores analógicos.

3. Objetivos

3.1. Finalidad del proyecto

El objetivo principal como proyecto es lograr el desarrollo de un pedal Wah Wah inalámbrico de bajo costo y consumo (véase sección 2: Justificación del proyecto) que pueda ser construido sin necesidad de importaciones irremplazables en el mercado local. El motivo de esto último se debe al contexto político que envuelve al país donde la disponibilidad de componentes está constantemente condicionada por la burocracia aduanera y el gobierno nacional de turno.

El objetivo con el cliente es lograr la fabricación de un producto novedoso que le sea versátil, intuitivo y cómodo de usar.

Finalmente el objetivo a largo plazo es la inserción al mercado amateur de los músicos y que este proyecto se vuelva un emprendimiento con el que se pueda incurrir en otros productos como bien pueden ser efectos sonoros (distorsión, Fuzz), amplificadores, diseño de consolas, etc.

4. Equipo de trabajo

El equipo de trabajo para llevar adelante el proyecto está compuesto por los siguientes 4 miembros:



Andres Bersier es inminente Ingeniero en Electrónica del Instituto Tecnológico Buenos Aires (ITBA). Su focalización es el procesamiento de señales y se ha desenvuelto en esta rama de la electrónica tras haber sido ayudante docente en “Análisis de señales y sistemas digitales” durante el primer cuatrimestre de 2015. También ha sido coautor del paper “IIR filter transient suppression by signal shifting”, presentado en la edición 2014 del congreso bienal argentino organizado por IEEE en la ciudad de San Carlos de Bariloche: ARGENCON. Actualmente tiene dedicación de tiempo completo a la fabricación y venta de equipos médicos en Roeder SA.



Gonzalo Rizzo nació en Zárate en el año 1992, se mudó en 1998 a Puerto Ordaz, Venezuela donde empezó sus estudios primarios en la escuela Iberoamericana. Volvió 5 años después a la Argentina para completar sus estudios secundarios en la ciudad de Zárate y recibirse como bachiller con orientación económica en el colegio “Dr. F. Jorge Hotton”. Actualmente es estudiante próximo a graduarse de Ingeniero en Electrónica en el Instituto Tecnológico Buenos Aires (ITBA). Desde el año 2012 ha participado en todas las ediciones de la competencia de programación IEEEExtreme, obteniendo importantes reconocimientos a nivel nacional.



Mauro Padin es estudiante de Ingeniería en Electrónica del Instituto Tecnológico Buenos Aires (ITBA) desde el año 2011. Durante su educación secundaria ha realizado proyectos como por ejemplo su “Estación meteorológica” presentada en las “Olimpiadas Nacionales de Electrónica y Telecomunicaciones 2010”, siendo galardonada con el primer puesto a nivel nacional. También ha realizado proyectos durante su etapa universitaria en el Grupo de Electrónica Digital Avanzada (GEDA) donde trabajó en una alerta telefónica; y en el Centro de Investigación de Tecnologías para la Salud (CITES) donde trabajó con señales EEG.



Pablo Gardella es estudiante de Ingeniería en Electrónica del Instituto Tecnológico Buenos Aires (ITBA). Realizó sus estudios secundarios en el Instituto Tecnológico San Bonifacio. Durante su etapa universitaria en el ITBA se ha desenvuelto como Ayudante de docente en las cátedras de “Matemática”, “Introducción a la computación”, “Electrotecnia”, “Teoría de circuitos” y “Análisis de señales y sistemas digitales”. Trabajó en proyectos de consultoría acústica desde el campo del procesamiento digital de señales. Actualmente se desempeña como pasante en un proyecto de renovación de las consolas visualizadoras de pulsos de radar para la Armada Argentina.

5. Definición del producto

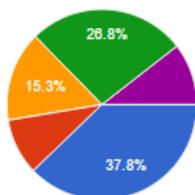
5.1. Encuesta

Para lograr una definición del producto se realizó una encuesta mediante Google Docs entre 24/04/2015 y el 03/05/2015. La misma comenzaba con una pregunta inicial que servía para calificar al participante según su conocimiento previo sobre Wah Wahs en 2 categorías que recibieron el nombre de “*Músicos*” y “*No-músicos*”. Seguido de esta primera pregunta la encuesta se ramificaba ya que para la confección de las especificaciones, la importancia de un usuario de Wah Wahs tiene mucha más preponderancia que la de un ajeno al tema. La opinión de los otros encuestados si bien a priori parecería no tener utilidad, se decidió dejarla de referencia en cuestiones como el precio y las posibles prestaciones que tendrá el nuevo Wah Wah.

La encuesta fue difundida a través de redes sociales y foros de músicos amateurs¹. Se asume que el porcentaje de participantes catalogados como “*Músicos*” responden a los músicos amaterus, es decir, el potencial mercado.

En la siguiente figura se presenta la primera pregunta con el gráfico de torta de las respuestas.

¿Sabés lo que es un pedal Wah-Wah?



Si, tengo uno y lo uso.	79	37.8%
Si, tengo uno pero no lo uso.	20	9.6%
Si, pero no tengo uno porque son demasiado caros.	32	15.3%
Si, pero no tengo uno porque no lo necesito.	56	26.8%
No, nunca había oído hablar de algo así.	22	10.5%

Figura 2: Pregunta inicial de la encuesta

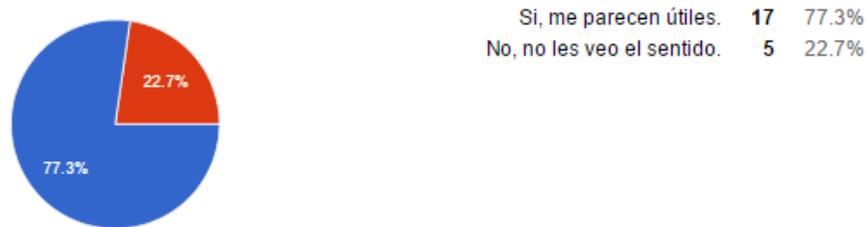
De esta pregunta se destaca que el 89,5% de los 209 encuestados sabían lo que es un Wah-Wah. Nótese que el 47,4% de la gente tiene un Wah Wah, pero a su vez, el 15,3% de la gente coincide en que su precio está por encima de lo que debería.

¹Guitarristas argentinos en Facebook, Foro "Sólo Músicos", Músicos Argentina Foro Activo.

Si el encuestado era un “*No-músico*”, en esta instancia la encuesta le facilitaba un video para que conozca a los Wah Wah². Después se le preguntaba su opinión sobre la utilidad del mismo. 4 de cada 5 personas coincidieron en que les parecían accesorios útiles.

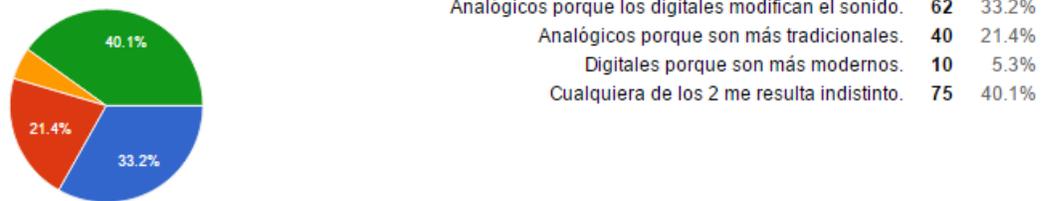
En cuanto a los “*Músicos*”, la primer pregunta por su preferencia entre Wah Wahs analógicos y digitales. El 40% no tiene una tendencia marcada, sin embargo debe tenerse en cuenta que el 33% de los “*Músicos*” encuestados cree que los pedales digitales modifican el sonido.

Ahora que ya sabés lo que es un Wah Wah, ¿Te parece un accesorio útil?



(a) No-músicos

¿Preferís pedales analógicos o digitales?



(b) Músicos

Figura 3: Primera pregunta

En la segunda pregunta se le presentaban las imágenes de Wah Wahs comerciales de la figura 4 y se le pedía una indicación numérica sobre la importancia de la estética. Un 1 correspondía a nada de importancia, mientras que un 10 implicaba máxima importancia. Se esperaba conseguir una distribución normal centrada entre 6 y 7. Si bien la cantidad de encuestados no fue la suficiente para que se forme este patrón, se identifica en el caso de los “*No-músicos*” que la moda estadística es de 7, tal cual se esperaba. El caso de los “*Músicos*” es un tanto distinto ya que 1 de cada 4 afirma que la estética no tiene importancia a la hora de la elección del producto.

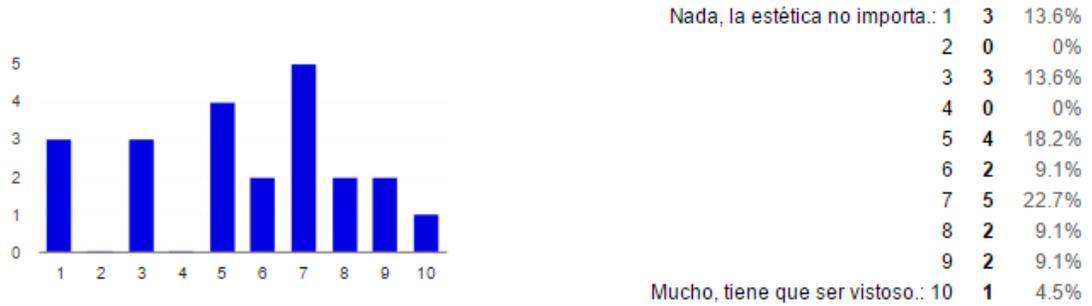


Figura 4: Modelos comerciales de Wah Wah.

²<https://www.youtube.com/watch?v=R87mpsSAHXg> ¿Qué es un pedal Wah Wah?

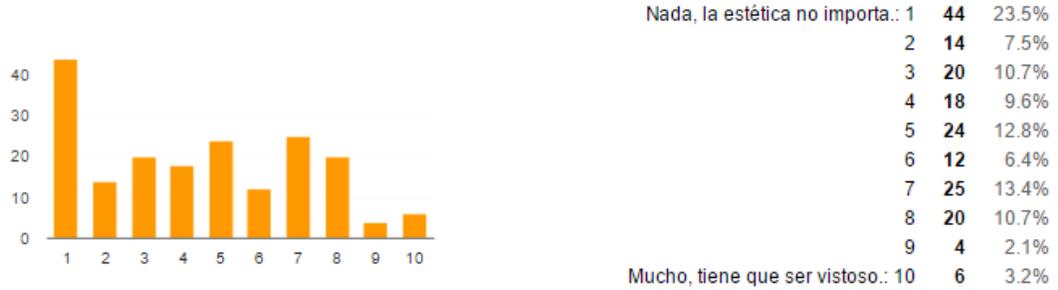
La media de los resultados fue de 5,6 para el caso de los “*No-músicos*”, lo cual coincide con la expectativa de que la estética tenga una importancia media de alrededor de 6 puntos. Sin embargo, en el otro caso, la media resultó ser más baja que lo esperado. El promedio obtenido fue de 4,4 debido al notorio desinterés por la estética que se manifiesta como una δ en 1, lo cuál no había sido estipulado y será un importante factor a la hora de tomar futuras decisiones, sobre todo en cuestiones económicas relacionadas a la estética que tendrá el pedal.

En una escala del 1 al 10 ¿Cuánto pesa la estética del Wah Wah a la hora de comprarlo?



(a) No-músicos

En una escala del 1 al 10 ¿Cuánto pesa la estética del Wah Wah a la hora de comprarlo?

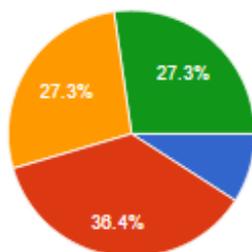


(b) Músicos

Figura 5: Segunda pregunta

La tercer pregunta les pedía seleccionar un rango posible de precios para un pedal Wah Wah. La gente siempre optó, lógicamente, por los precios más bajos. Sin embargo, la opción de entre \$1500 y \$2000 que fue elegida por casi 1 de cada 4 personas en los “*No-músicos*” se adecúa a las expectativas tratadas en la sección 6.3: Factibilidad económica. En cuanto a las elecciones de los “*Músicos*” se destaca que al ser estos conocedores de los precios del mercado, hubo un porcentaje de ellos (5% *en este caso*) que creyó razonable un precio superior a los \$2000.

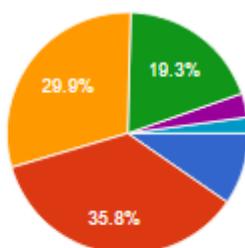
¿Cuál te parece que es un precio razonable para un pedal Wah Wah?



Menos de 500\$.	2	9.1%
Entre 500\$ y 1000\$.	8	36.4%
Entre 1000\$ y 1500\$.	6	27.3%
Entre 1500\$ y 2000\$.	6	27.3%
Entre 2000\$ y 2500\$.	0	0%
Entre 2500\$ y 3000\$.	0	0%
Más de 3000\$.	0	0%

(a) No-músicos

¿Cuál te parece que es un precio razonable para un pedal Wah Wah?



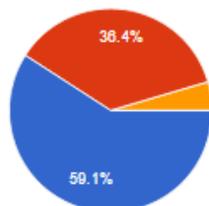
Menos de 500\$.	18	9.6%
Entre 500\$ y 1000\$.	67	35.8%
Entre 1000\$ y 1500\$.	56	29.9%
Entre 1500\$ y 2000\$.	36	19.3%
Entre 2000\$ y 2500\$.	6	3.2%
Entre 2500\$ y 3000\$.	4	2.1%
Más de 3000\$.	0	0%

(b) Músicos

Figura 6: Tercera pregunta

En la cuarta pregunta se les explicó brevemente la propuesta del proyecto pertinente y se les pidió su opinión. El 60% de los “*No-músicos*” y el 70% de los “*Músicos*” afirmaron que lo usarían. Debe notarse la tendencia reacia de los “*Músicos*” hacia lo digital ya que casi 1 de cada 10 no usaría el Wah Wah porque tiene control digital.

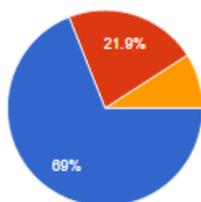
Si te ofrecemos un Wah Wah analógico como los tradicionales, pero controlado digitalmente ¿Lo usarías?



Respuesta	Cantidad	Porcentaje
Si, ¿por qué no?	13	59.1%
Sólo si suena igual que uno analógico.	8	36.4%
No, porque tiene control digital.	1	4.5%

(a) No-músicos

Si te ofrecemos un Wah Wah analógico como los tradicionales, pero controlado digitalmente ¿Lo usarías?



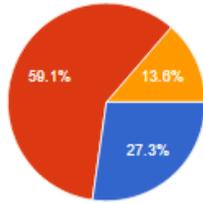
Respuesta	Cantidad	Porcentaje
Si, ¿por qué no?	129	69%
Sólo si suena igual que uno analógico.	41	21.9%
No, porque tiene control digital.	17	9.1%

(b) Músicos

Figura 7: Cuarta pregunta

La quinta pregunta consistía en evaluar el impacto del cambio de paradigma en el control del Wah Wah. Los resultados indican que si bien hay interés en el control inalámbrico este no es determinante (60% en el caso de los “*No-músicos*”, mientras que 40% en el caso de los “*Músicos*”).

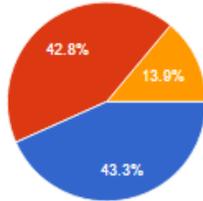
¿Te interesa la posibilidad de controlar el efecto de nuevas formas a costa de reemplazar el pedal tradicional, por el Wah Wah y el sensor móvil?



Si, me interesa mucho.	6	27.3%
Si, me interesa pero hasta ahí nomás.	13	59.1%
No, no le veo el sentido.	3	13.6%

(a) No-músicos

¿Te interesa la posibilidad de controlar el efecto de nuevas formas a costa de reemplazar el pedal tradicional, por el Wah Wah y el sensor móvil?



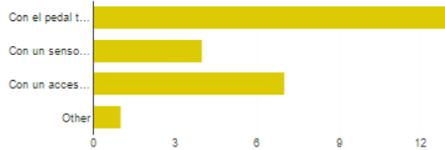
Si, me interesa mucho.	81	43.3%
Si, me interesa pero hasta ahí nomás.	80	42.8%
No, no le veo el sentido.	26	13.9%

(b) Músicos

Figura 8: Quinta pregunta

La sexta pregunta tiene como objetivo que los usuarios valoren las nuevas alternativas de control para el pedal. Casi el 60% de los “*No-músicos*” optó por el pedal tradicional aún siendo este inalámbrico. Lo mismo ocurrió con los “*Músicos*”.

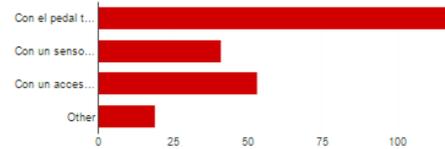
¿Cómo te gustaría controlar el efecto?



Con el pedal tradicional.	13	59.1%
Con un sensor que mida la inclinación de la guitarra.	4	18.2%
Con un accesorio que mida la inclinación de mi pie imitando que presiono el pedal.	7	31.8%
Other	1	4.5%

(a) No-músicos

¿Cómo te gustaría controlar el efecto?



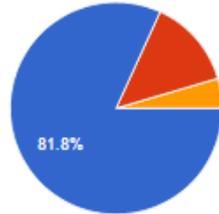
Con el pedal tradicional.	117	62.6%
Con un sensor que mida la inclinación de la guitarra.	41	21.9%
Con un accesorio que mida la inclinación de mi pie imitando que presiono el pedal.	53	28.3%
Other	19	10.2%

(b) Músicos

Figura 9: Sexta pregunta

La séptima pregunta se refería a la interfaz. 4 de cada 5 “*No-músicos*” prefirió por un control inalámbrico, mientras que en cuanto a los “*Músicos*”, si bien 1 de cada 4 quiere conservar el modelo tradicional, el 58% acepta que el control sea inalámbrico.

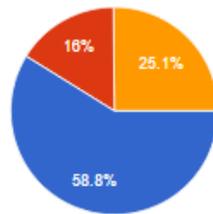
¿Cómo preferís que se conecten el Wah Wah y el sensor?



De forma inalámbrica.	18	81.8%
Por cable.	3	13.6%
Prefiero conservar el modelo tradicional.	1	4.5%

(a) No-músicos

¿Cómo preferís que se conecten el Wah Wah y el sensor?



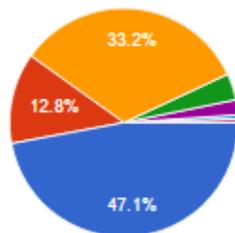
De forma inalámbrica.	110	58.8%
Por cable.	30	16%
Prefiero conservar el modelo tradicional.	47	25.1%

(b) Músicos

Figura 10: Séptima pregunta

Las siguientes preguntas fueron exclusivas de los “*Músicos*” con el fin de tener más información disponible para la confección de los requerimientos.

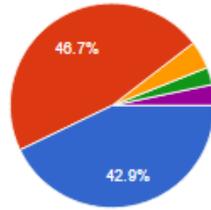
¿Cuánto usas el Wah Wah por día?



No tengo.	88	47.1%
Tengo pero no lo uso.	24	12.8%
Menos de 1 hora.	62	33.2%
Entre 1 y 2 horas.	7	3.7%
Entre 2 y 3 horas.	4	2.1%
Entre 3 y 4 horas.	1	0.5%
Más de 4 horas.	1	0.5%

Figura 11: Uso diario del Wah Wah

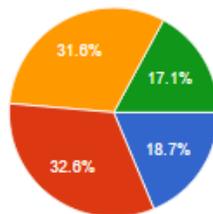
¿Tuviste algún problema con tu Wah Wah?



No tengo Wah Wah.	78	41.7%
No, nunca se me rompió.	85	45.5%
Si, se me rompió en menos de un año.	8	4.3%
Si, se me rompió en menos de 5 años.	5	2.7%
Si, se me rompió en menos de 10 años.	6	3.2%

Figura 12: Problemas con el Wah Wah

¿Tocás en una banda?



Si, es mi trabajo.	35	18.7%
Si, lo hago por hobby.	61	32.6%
Actualmente no, pero toqué alguna vez.	59	31.6%
No, nunca toqué.	32	17.1%

Figura 13: Pedales analógicos vs digitales

La encuesta contenía al final un cuadro de texto para que la gente pueda hacer comentarios. De ese campo surgieron algunas sugerencias interesantes para el producto, como la posibilidad de agregar efectos de By Pass, Fuzz, Distorsión, etc.

5.2. Requerimientos

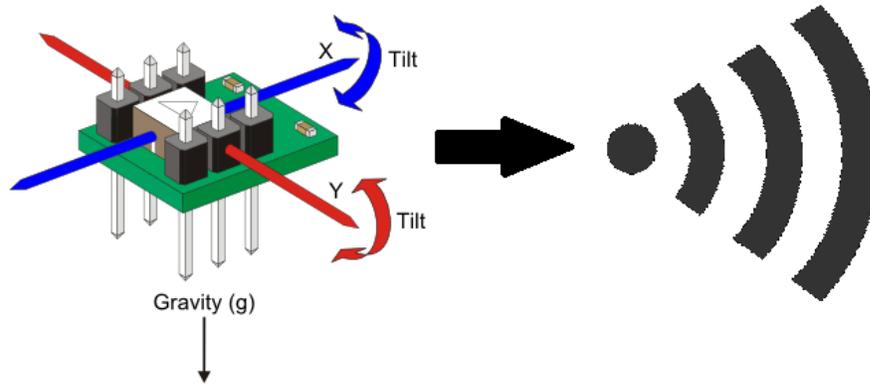
De los resultados de la encuesta que se fueron presentando en los gráficos de torta anteriores se llegaron a los siguientes requerimientos por parte de los usuarios:

- El producto debe estar compuesto por un transmisor y un receptor. El receptor es el módulo al cual la guitarra se conecta y éste se conecta al amplificador, mientras que el transmisor es un módulo que debe controlar el efecto del filtro por medio de su inclinación cuando éste se encuentra unido al mástil de una guitarra.
- El filtrado de la señal debe ser analógico.
- El efecto debe poder ser controlado a partir de la inclinación de la guitarra.
- La autonomía del módulo inalámbrico sea la mayor posible.
- El alcance del módulo debe ser lo mayor posible.
- Que no haya impacto de la ausencia del cable en la calidad del sonido.

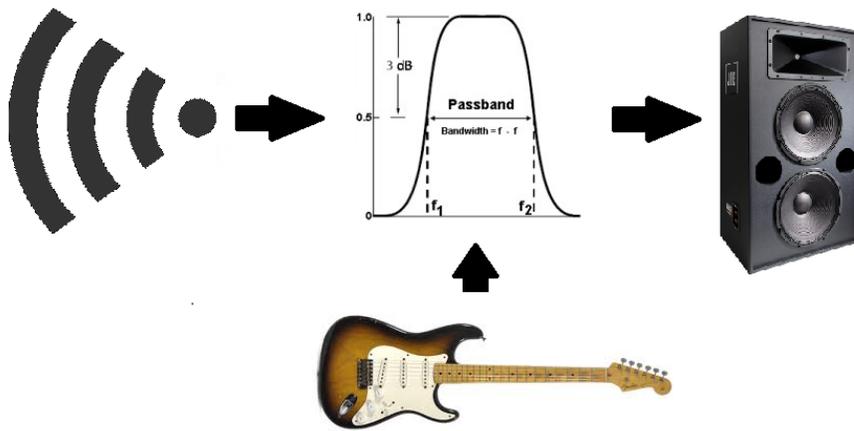
5.3. Especificaciones funcionales y de diseño

Las especificaciones que se listan en esta sección son las destinadas a satisfacer cada uno de los requerimientos de los clientes.

El producto debe componerse por los siguientes bloques funcionales:



(a) Módulo transmisor



(b) Módulo receptor

Figura 14: Bloques elementales

5.3.1. Especificaciones del Hardware

Según los resultados de la encuesta, con la pregunta “¿Cuántas horas por día usas el Wah Wah?” (figura 11) se conoció que el uso diario es de entre 1 y 2 horas como máximo por lo que la autonomía de este se fijó en 2 *hs*. En cuanto a la fuente de alimentación se estableció una corriente máxima de 25mA para el transmisor y una de 50mA para el receptor, basados en consumos de simulaciones e información de hojas de datos. En base a este dato y la autonomía requerida se podrá saber cómo debe ser la batería. El resto de las especificaciones pueden ser encontradas en las siguientes tablas:

Característica	Mínimo	Máximo
Autonomía de uso continuo [Hs]	2	-
Dimensiones [cm]	-	10x5x5
Peso [Kg]	-	0.5
Alcance máximo* [m]	10.0	-
IP*	55	-
Disipación (25°C) [W]	-	0,5
Tensión de entrada [V]	2.8	3.6
Consumo [mA]	-	25
Ancho de banda [Hz]	-	10.0

Cuadro 1: Especificaciones del transmisor.

* Nivel de protección (International Protection) según IEC 529³

El módulo receptor será el que realice el procesamiento de la señal así que debe cumplir no solo las mismas que el transmisor (con algo más de holgura para el peso ya que será un módulo estático) sino que debe asegurar que el filtrado de la señal sea lo más eficiente posible. Por esta razón se impone que la disipación térmica del módulo sea menor a medio Watt a una temperatura ambiente de 25°C, entre otras cosas.

Característica	Mínimo	Máximo
Autonomía de uso continuo [Hs]	2	-
Dimensiones [cm]	-	15x15x5
Peso [Kg]	-	1.0
Alcance máximo* [m]	10.0	-
IP*	55	-
Disipación (25°C) [W]	-	0.5
Tensión de entrada [V]	6	15
Consumo [mA]	-	50
$f_{min} (k = 0)$ [Hz]	-	500
$f_{max} (k = 1)$ [Hz]	2000	-
Impedancia de entrada [Ω]	50k	-
THD @ 1kHz [%]	-	5

Cuadro 2: Especificaciones del receptor.

*Alcance mínimo requerido en condiciones de campo abierto.

5.3.2. Especificaciones del Software

Si bien no fue un requerimiento del mercado, para el desarrollo del producto sería útil usar una aplicación con la que se pueda controlar el efecto del filtro. El receptor debe ser capaz de recibir los datos del acelerómetro desde una aplicación celular que corra sobre sistemas operativos Android, al menos. La elección de este sistema operativo se fundamenta en que es el más utilizado por el potencial mercado (Argentina). La aplicación para celulares debe ser capaz de reemplazar al transmisor.

S.O. soportados	Android
Interfaz	Bluetooth

Cuadro 3: Especificaciones del software.

³Ver tabla de los niveles de protección en el anexo.

5.4. Casa de calidad

La casa de calidad construida en función de los requerimientos de los clientes y las especificaciones extraídas de la encuesta se presenta a continuación (O sea, los rasgos distintivos del producto como es el Peso, Versatilidad de Efectos, Tamaño, Autonomía, Expresividad y Precio).

QFD: House of Quality
 Project: Wah Wah
 Revision: 1
 Date: 25/5/2015

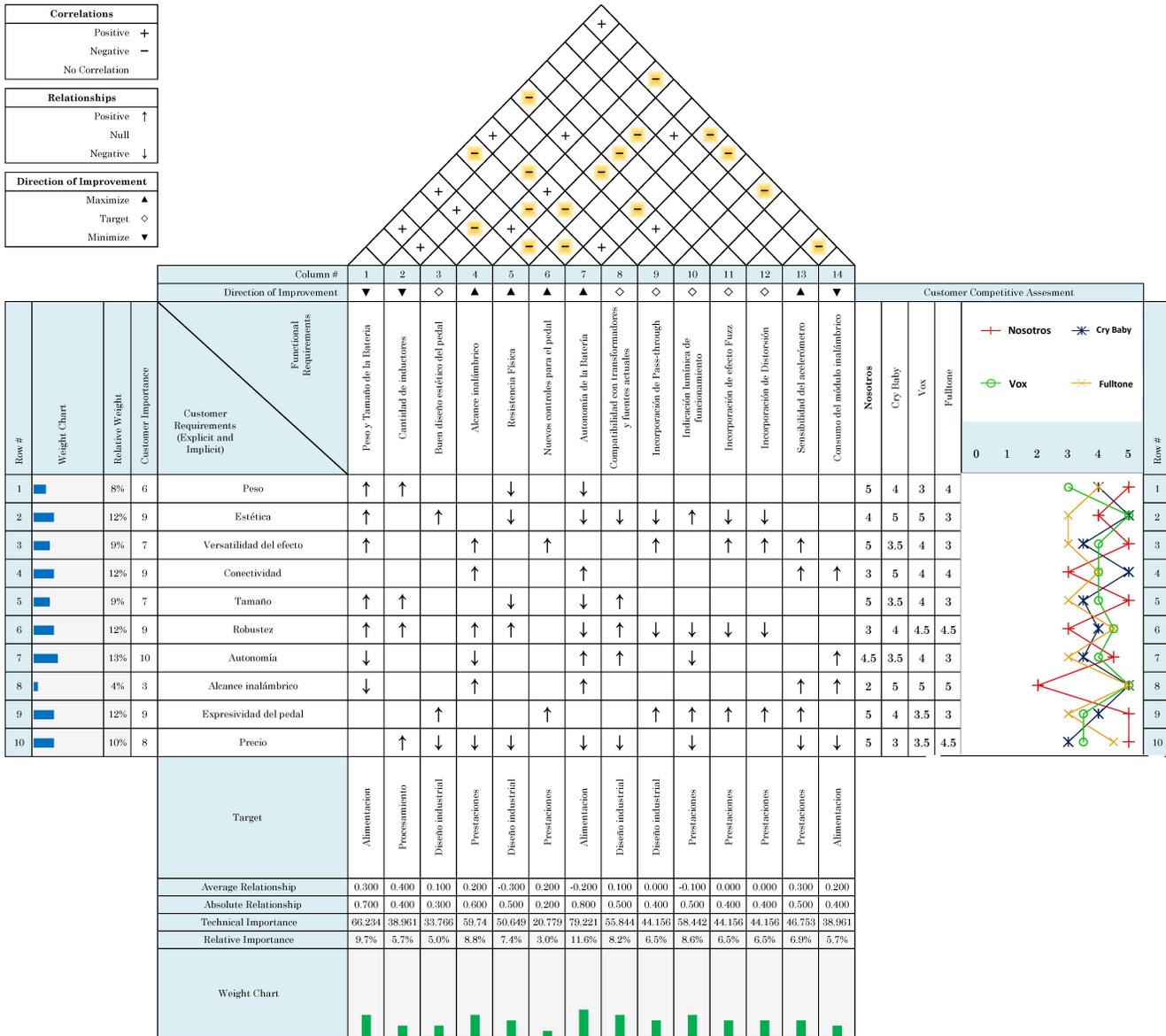


Figura 15: Casa de calidad.

6. Análisis de factibilidad

6.1. Factibilidad tecnológica

6.1.1. Propuesta de alternativas de diseño

Módulo de comunicación: En primer instancia se proponen alternativas para la conectividad entre los módulos transmisor y receptor del Wah Wah.

- *Conectividad inalámbrica por FM:* Este tipo de conectividad es descartado prácticamente desde el comienzo ya que no es compatible con la interfaz celular que se le pretende dar al producto.
- *Conectividad inalámbrica mediante infrarojo:* Este tipo de vínculos es sumamente direccional y como el uso normal del producto no puede garantizar esta condición, se descarta el infrarojo por no poder cumplir con las prestaciones requeridas por el cliente.
- *Conectividad inalámbrica mediante Wi-Fi:* Este tipo de conectividad si bien permite cumplir con el alcance propuesto y no tiene el problema de la direccionalidad del infrarojo, tiene el problema que alcanza velocidades de transmisión sumamente elevadas (11 Mbit/s), lo cual es excesivo para la aplicación que se le quiere dar, donde sólo se debe muestrear apenas un movimiento humano (una frecuencia de muestreo de 50 Hz es más que suficiente para este fin). No obstante esta cualidad, el mayor problema del Wi-Fi es el consumo que requiere y que los integrantes del proyecto no han trabajado nunca con módulos de este tipo. El tiempo de aprendizaje de esta tecnología es una razón más para descartarla frente a la solución del Bluetooth.
- *Conectividad inalámbrica por Bluetooth:* Este tipo de solución fue la elegida al no presentar problemas de alcance, directividad, tasa de datos ni consumo. Además, como bien se dijo con el análisis del vínculo Wi-Fi, el grupo ya conoce cómo usar esta tecnología.

Se decidió utilizar Bluetooth para la comunicación entre los módulos del Wah Wah por las siguientes razones:

1. Este tipo de conectividad tiene la ventaja respecto a otras formas de conexión inalámbrica en la simpleza para conectarse con computadoras, celulares u otros dispositivos.
2. Los modelos comerciales actuales de Bluetooth pueden alcanzar niveles superlativamente bajos de consumo.
3. Otra opción viable teniendo en cuenta su facilidad de uso para los usuarios es el Wi-Fi, el cual fue descartado debido a que este posee un consumo mayor y además posee un precio más elevado con respecto al Bluetooth.

Fuente de alimentación: La elección de la fuente de alimentación no es un detalle menor en el diseño del Wah Wah, ya que cada uno de los módulos deberá tener su propia fuente de energía. En primer lugar se consideró utilizar una conexión a la tensión de línea y adaptarla a los niveles necesarios mediante un transformador con una etapa rectificadora para cada módulo, pero los riesgos de electrocución para el usuario y la normativa que obliga a cumplir, incluidas validaciones y certificaciones que incrementarían los costos, llevaron a que se opte por la utilización de una batería en cada módulo. Se contempló la posibilidad que las mismas sean recargables, sin embargo esto fue descartado ya que la incorporación del cargador y del controlador de batería (para gestionar su carga y descarga) aumentaban los costos innecesariamente.

Como se verá más adelante en el DFMEA (ver tabla 5) para eliminar la posibilidad de riesgo de electrocución y reducir la inducción de la tensión de línea se prefiere el uso de baterías. Se decidió

brindar la posibilidad de utilizar una fuente externa en el receptor para ser compatible con algunos modelos comerciales actuales de Wah Wah.

Para definir las baterías, se sabe que esta debe ser capaz de suplir el consumo de las interfaces Bluetooth, el del acelerómetro, el del microcontrolador o el del resto del circuito. Es por esto que para el receptor se definió el uso de una batería de 9V y se deja la posibilidad de una entrada externa de DC (como en la mayoría de los Wah Wahs comerciales), mientras que para el transmisor se utilizará una pila de reloj de 3V (CR2032), o para los usuarios que desean que la misma sea recargable, usar la aplicación del celular. No se proveerá un cargador de baterías.

Filtrado analógico: La función principal del Wah Wah es la de realizar un filtrado analógico mediante un filtro pasa banda cuya frecuencia central se controla por medio de un potenciómetro que se mueve según el pedal. El filtrado en sí debe ser ser analógico por requisito del mercado. Por lo que en esta sección se analizarán sus alternativas de diseño.

1. *Filtro con transistores e inductor (Vox):* Este es el circuito tradicional con el que funcionan los Wah Wahs comerciales de Vox (ver figura 16). Al realizar el filtrado pasabanda mediante la resonancia entre un inductor y un capacitor se pueden conseguir altos factores de selectividad con dependencias de pocos componentes. Además de esta ventaja, el circuito con inductor cuenta con una aceptación plena del mercado, ya que como se conoció a partir de la encuesta, el mercado prefiere que el Wah Wah tenga un inductor aún cuando digitalmente se consiga realizar el mismo filtrado y la presencia de este aumente sustancialmente su precio.

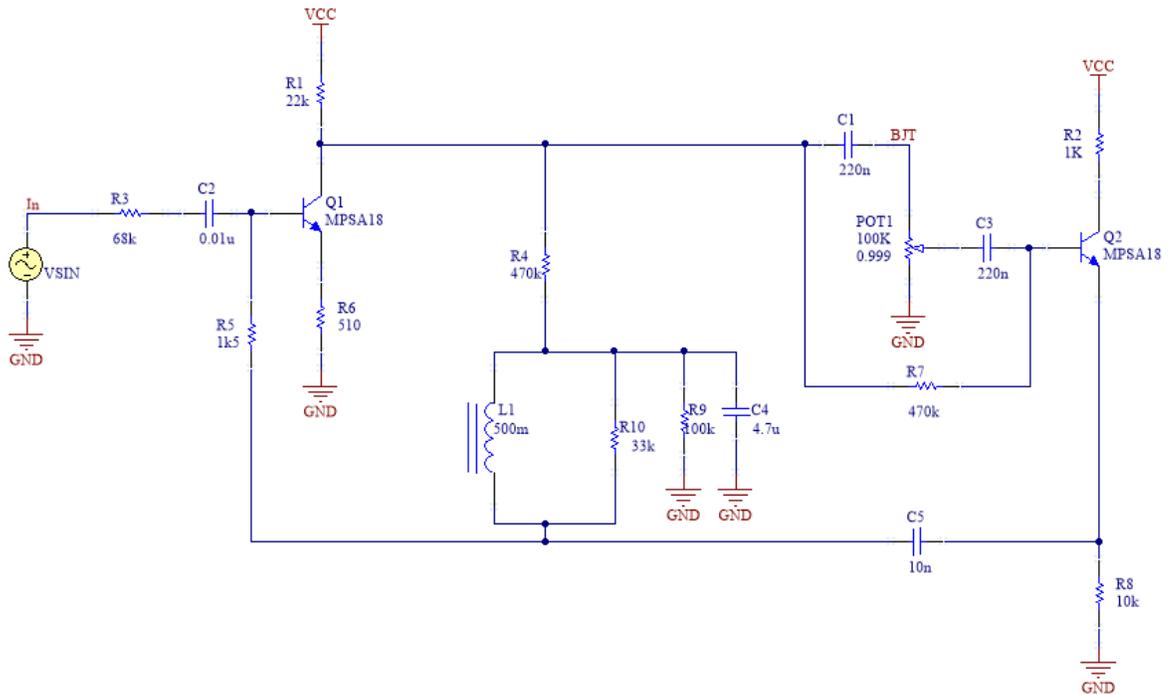


Figura 16: Circuito de *Vox* con transistores e inductor. La salida del circuito es el nodo denominado “BJT”, en alusión al tipo de tecnología que emplea el circuito.

2. *Filtro con transistores e inductor (Cry-Baby):* El circuito de *Cry-Baby* es muy similar al de *Vox* en cuanto al filtrado de la señal, la principal diferencia es que se le añade una etapa de buffer a la

entrada como se puede ver en la figura 17. Dicha etapa lo único que hace es ser una ganancia fuera del lazo de realimentación que permite aumentar la impedancia de entrada.

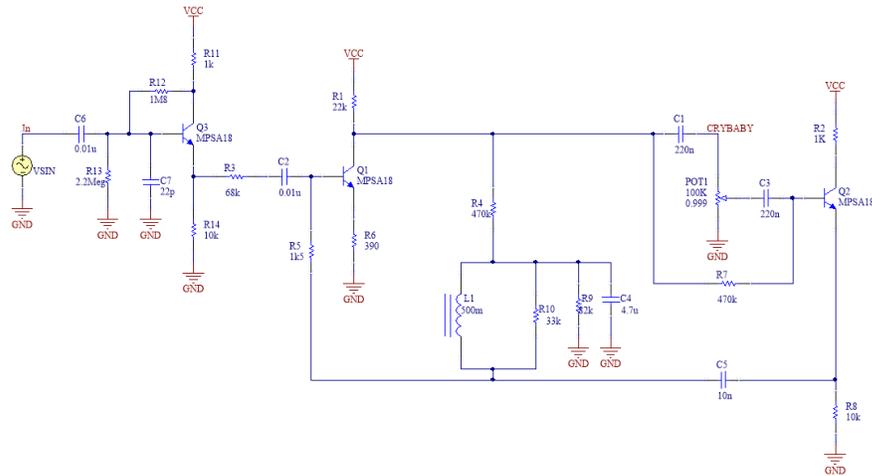


Figura 17: Circuito de *CryBaby* con transistores e inductor. La salida del circuito es el nodo denominado “CRYBABY”, en alusión al fabricante.

3. *Filtro con transistores e inductor (Colorsound)*: Este circuito se ilustra en la siguiente figura y como bien se puede apreciar en ella utiliza un solo transistor de amplificación que también es el encargado de realizar el filtrado pasabanda mediante una realimentación doble T[6]. Se descarta este circuito para el diseño por ser de los que tiene peor performance según el mercado.

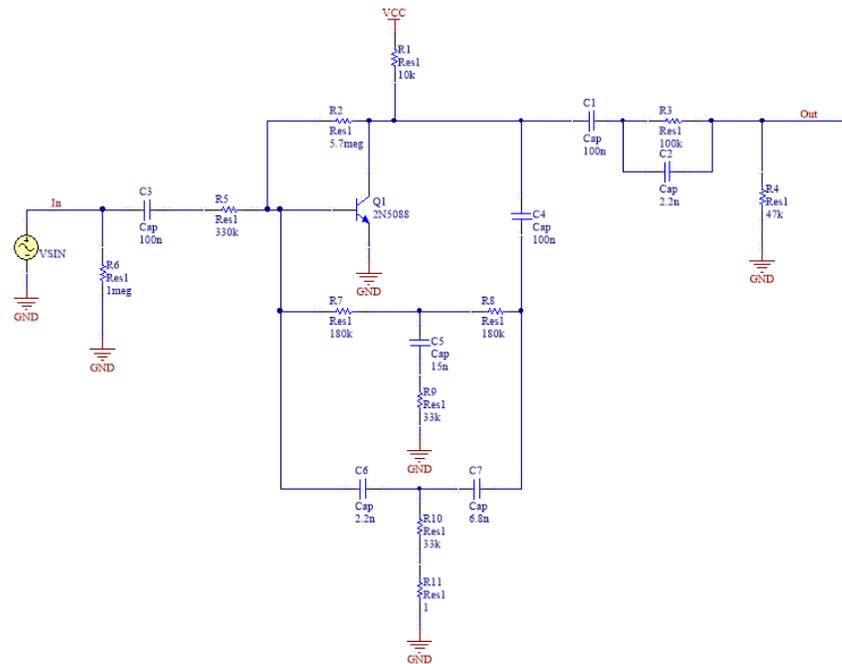


Figura 18: Circuito con transistores e inductor de *Colorsound*.

4. *Filtro con amplificador operacional sin inductor (Doble T)*: Este circuito es ideal para la producción en serie porque la mayoría de las resistencias y capacitores son iguales entre sí, y sólo demanda el uso de un único amplificador operacional[6]. Además permite conseguir altos factores de calidad, el problema de este circuito es que la frecuencia central del pasabanda depende de las 3 resistencias, por lo que esto triplicaría el costo de los potenciómetros digitales.

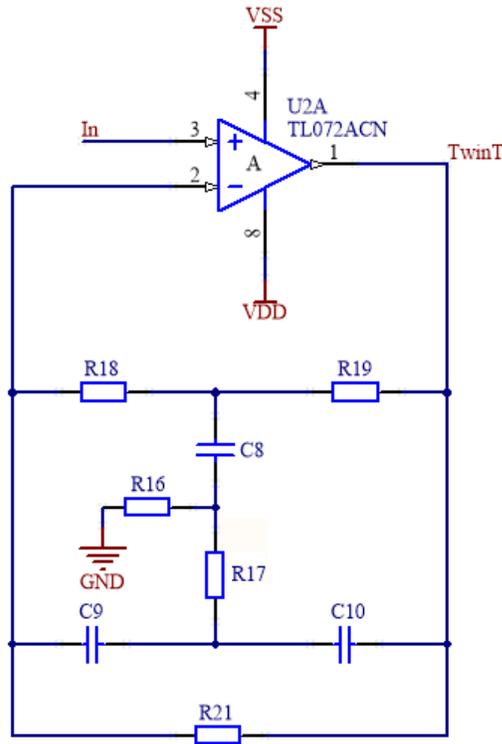


Figura 19: Circuito con amplificador operacional sin inductor (Doble T).

5. *Filtro con amplificador operacional sin inductor (Celda universal Tow-Thomas)*: De entre todas las celdas universales se eligió la Tow-Thomas por 2 razones: la celda universal genérica no tenía sentido para este caso porque la salida pasa-altos no es de interés en el Wah Wah y disponer de ella requiere utilizar más componentes. La celda Tow-Thomas consiste en la celda universal genérica pero sin la salida pasa-altos (esto permite economizar un amplificador operacional y 2 resistencias). Y en segundo lugar, la celda Åkerberg-Mossberg se la descarta porque su integrador no-inversor compromete la estabilidad del filtro[7]. La celda Tow-Thomas tiene la ventaja de lograr un ajuste independiente de Q , ganancia y frecuencia de los polos. La contrapartida de esta característica es que se necesitan muchos componentes (varios amplificadores operacionales y resistencias de distintos valores). No obstante eso, las celdas universales no son capaces de sintetizar filtros con valores elevados de Q y para mover la frecuencia de ambos polos se deberían utilizar 2 potenciómetros digitales, uno para mover la constante de cada integrador.

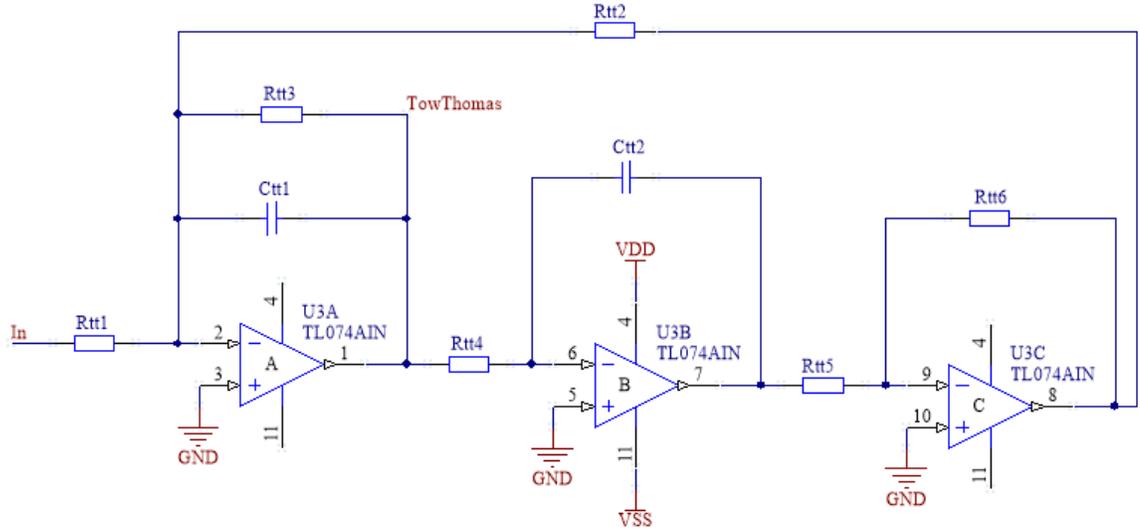


Figura 20: Circuito con amplificador operacional sin inductor (Celda universal Tow-Thomas).

6. *Filtro con amplificador operacional sin inductor (Celda Rauch o Deliyannis friend modificada):* Esta celda tiene la ventaja respecto de las universales en la cantidad de componentes que necesita y que permite conseguir altos valores de Q , por lo que a priori sería la opción técnicamente más viable para realizar el filtrado pasabanda requerido.

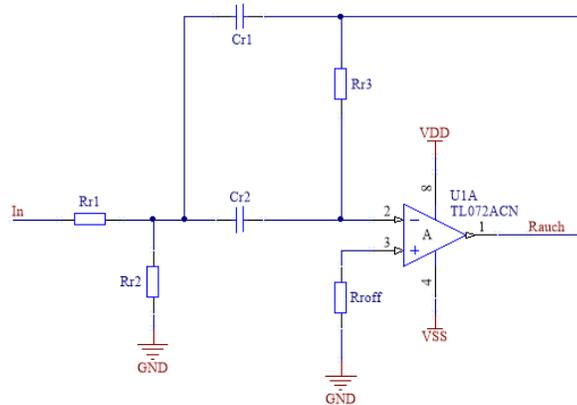


Figura 21: Circuito con amplificador operacional sin inductor (Celda Rauch o Deliyannis friend modificada).

Como para el mercado la calidad de los pedales *Vox* y *Cry-Baby* es prácticamente la misma, se opta por el circuito de *Cry-Baby* ya que al poseer una etapa más con un buffer, se asegura cumplir así con la especificación de impedancia de entrada y no generar problemas por posibles desadaptaciones. Por lo tanto de ahora en más cuando se haga referencia a un circuito con transistores e inductor será tácito que se refiere al circuito de *Cry-Baby* de la figura 17.

En cuanto a los circuitos con amplificadores operacionales se considera como candidatos técnicamente viables a la celda Rauch y la doble T para simular la transferencia del circuito de *Cry-Baby*. Se descartan las celdas universales ya que estas no permiten alcanzar valores tan elevados de Q como los que se requieren (ver la sección 7.2.2 y en particular la figura 50).

En la sección de “*Ingeniería de detalle*” se estudiará el circuito con transistores e inductor de *Cry-Baby* más los circuitos con operacionales para poder desarrollar el producto deseado. Es probable que ninguno de los circuitos planteados con operacionales sea capaz de replicar la función transferencia del circuito a transistores (ver sección 7.2.2: Detalles de diseño), por lo que probablemente se deberá considerar incluir el inductor de $0,5H$ en los diseños con operacionales, también motivados por la tendencia del mercado hacia ellos y la cantidad de potenciómetros digitales que se deben incluir en el circuito (en el caso que se deban cambiar a la vez varios valores de resistencias).

Microcontrolador: Se debe utilizar un microcontrolador en el módulo receptor para comunicar al receptor Bluetooth con el potenciómetro digital. Se descartó la opción de utilizar un DSP o una FPGA debido a los elevados costos de estos frente a un microcontrolador.

En base a las prestaciones necesarias, el microcontrolador debe poseer exclusivamente los módulos de UART y SPI, para la transferencia de datos mediante el receptor Bluetooth y el potenciómetro digital. Adicionalmente son necesarios puertos de GPIO para el control del receptor Bluetooth y la interfaz con el usuario mediante LEDs.

Hoy en día todos los microcontroladores disponibles en el mercado poseen los módulos requeridos. Los principales puntos a analizar para la elección del mismo rigen en cuanto al bajo consumo, bajo precio, encapsulado que permita ser instalado con un horno o estación de soldado y experiencia en utilización del microcontrolador o IDE por parte de los integrantes del grupo de desarrollo. Teniendo en cuenta todo esto, se llegó a las siguientes alternativas:

	Texas Instruments	Freescale		ST Microelectronics
	<i>MSP430</i>	<i>Kinetis L</i>	<i>Kinetis K</i>	<i>STM32 L</i>
f_{CLK}^{max}	25MHz	48MHz	120MHz	32MHz
$I_{DD} _{f_{CLK}^{max}}$	<i>Run_{max}</i>	10mA	5mA	5mA
	<i>Stop</i>	1μA	1μA	1μA
Arquitectura	RISC 16 bits	ARM Cortex M0+ 32bits	ARM Cortex M4 32bits	ARM Cortex M0+ 32bits
UART/SPI	Si	Si	Si	Si
Encapsulados	LQFP	LQFP/QFN	LQFP/QFN	LQFP/QFN
Precio / 1000u	1 – 3U\$S	1 – 3U\$S	2 – 5U\$S	1 – 4U\$S

Cuadro 4: Comparación de microcontroladores

Las alternativas de MSP430F y Kinetis K son descartadas debido a su alto consumo comparado con los microcontroladores restantes. En cuanto a los encapsulados, todas las alternativas son viables ya que utilizan un encapsulado compatible para el diseño de prototipos y desarrollo (LQFP y QFN). Las alternativas de SMT32 L y Kinetis L, poseen características muy similares en cuanto a consumo, pero *finalmente se decidió por la alternativa de la familia **Kinetis L** debido la ventaja competitiva que otorga el know-how en el uso del mismo.*

6.1.2. Análisis modal de fallas y efectos (DFMEA)

A continuación se presenta el DFMEA del proyecto con los resultados de la ejecución de las acciones recomendadas en las fallas que se lo consideró necesario según el criterio que se explica luego del DFMEA.

Id	Clase	Falla potencial	EPF	S	Causas Potenciales	O	Control Actual	D	RPN	AR	Resultados		
											AE?	O'	RPN'
1	A	Integridad de la señal comprometida.	Ruido indeseado en el sonido de salida.	9	Ruido inducido desde la parte digital a la analógica.	9	-	2	162	Separación planos de masa.	Si	1	36
2	A	Integridad de la señal comprometida.	Ruido indeseado en el sonido de salida.	9	Ruido inducido desde la tensión de línea.	9	-	1	81	Uso de baterías.	Si	1	9
3	A	Desacople de impedancias.	Reducción del volumen.	7	Baja impedancia de entrada en el Wah Wah*.	5	-	9	315	Colocar buffer de entrada.	Si	1	63
4	A	Desacople de impedancias.	Reducción del volumen.	7	Alta impedancia de salida en el Wah Wah*.	1	Se toma la salida en un nodo de baja impedancia.	8	56	Colocar buffer de salida.	No	1	56
5	A	Funcionamiento inadecuado de la guitarra.	Sonido de salida indeseado.	10	Componente de DC introducido por el Wah Wah.	3	-	8	240	Introducir capacitores en serie.	Si	1	80
6	B	Tensión de alimentación inapropiada.	Se rompe.	10	Alimentación de entrada al revés.	3	-	2	60	Utilizar conector polarizado.	Si	1	20
7	B	Tensión de alimentación inapropiada.	Funcionamiento indebido de la etapa digital.	5	Alimentación de entrada ruidosa.	5	Se utilizan sólo capacitores cerámicos.	7	175	Introducir filtros pasivos.	Si	2	70
8	B	Seguridad del usuario comprometida.	Electrocución del usuario.	10	Cortocircuito en etapa de entrada.	6	-	2	120	Uso de baterías.	Si	1	20

Cuadro 5: Análisis modal de fallas y efectos (DFMEA). Primera parte.

*Por baja o alta impedancia (de entrada o salida, respectivamente) se entiende que las impedancias involucradas provoquen una transferencia de tensión donde se pierda más del 25 % de la amplitud máxima de la señal.

Id	Clase	Falla	EPF	S	Causas Potenciales	O	Control Actual	D	RPN	AR	Resultados		
											AE?	O'	RPN'
9	C	Aumento de la temperatura.	El usuario se quema.	6	Aumento de corrientes por envalamiento térmico.	5	Resistencias de protección térmica.	2	60	Sensor de temperatura.	No	5	60
10	D	Funcionamiento inadecuado del acelerómetro.	No es posible determinar la posición.	10	Error en el dato del acelerómetro.	7	Eliminación de outliers.	3	210	Emplear criterios de máxima verosimilitud	Si	1	30
11	D	Integridad de la señal comprometida.	Interrupción del sonido de salida.	9	Falla en la comunicación.	9	-	5	405	Algoritmo de backup en caso de desconexión.	Si	2	90
12	D	Integridad de la señal comprometida.	Sonido de salida indeseado.	9	Dos dispositivos conectados al mismo Bluetooth.	8	-	2	144	Algoritmo de encriptación.	Si	1	18

Cuadro 6: Análisis modal de fallas y efectos (DFMEA). Segunda parte.

Nomenclatura:

- **EPF**: Efectos Posibles de la Falla.
- **S**: Índice de Severidad. (1 poco severo, 10 muy severo)
- **CP**: Causas potenciales.
- **O**: Índice de Ocurrencia. (1 poco común, 10 muy común)
- **O'**: Es el índice de Ocurrencia una vez aplicadas las Acciones Recomendadas.
- **CA**: Controles Actuales.
- **D**: Tasa de detección. (1 fácilmente detectable, 10 difícilmente detectable)
- **RPN**: Número de Prioridad del Riesgo (cuanto más alto sea el número, más prioridad tiene el evento asociado).
- **RPN'**: Es el RPN una vez aplicadas las Acciones Recomendadas.
- **AR**: Acción Recomendada.
- **AE?**: Indica si la acción recomendada fue ejecutada (¿Acción Ejecutada?). Las respuestas pueden ser por “*Si*” o por “*No*”.
- **Clases usadas**:
 - A: Procesamiento
 - B: Alimentación
 - C: Hardware
 - D: Software

Se considera que una potencial falla debe ser tratada cuando dos de las variables intervinientes (Severidad, Ocurrencia o Detectabilidad) son máximas, o bien, cuando el RPN es mayor o igual a 100.

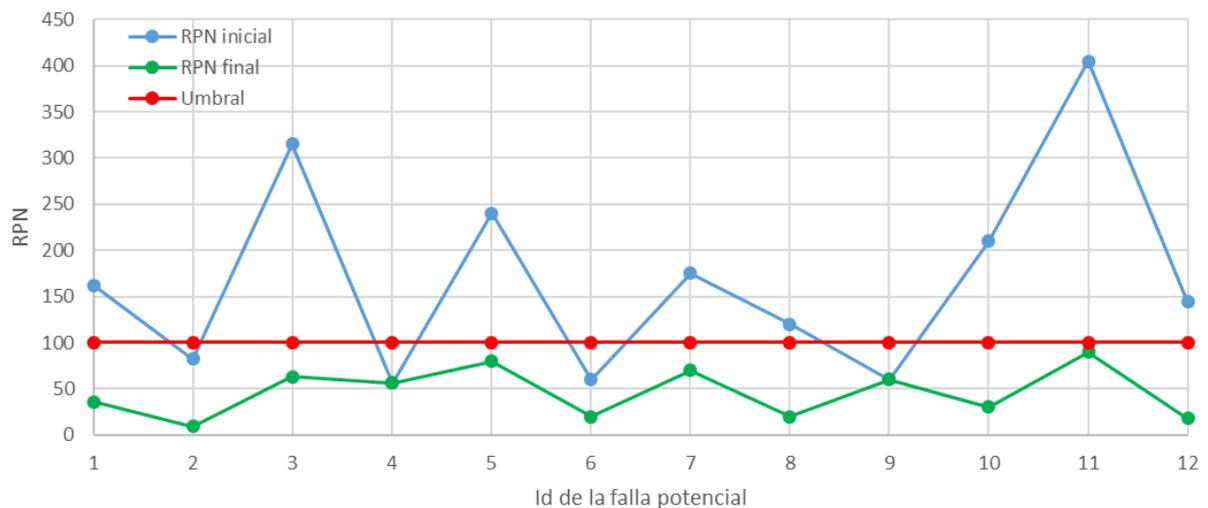


Figura 22: Evolución de los Números de Prioridad del Riesgo (RPN).

6.2. Factibilidad de tiempos

El estudio de factibilidad que se presenta en esta sección tiene como objetivo estimar el tiempo de dedicación al proyecto por parte del equipo de trabajo y determinar así el costo de oportunidad que acarrea su realización.

6.2.1. Planificación del proyecto (PERT)

La planificación de un proyecto implica: Tener claro su objetivo, determinar la fecha de cumplimiento las actividades o tareas y sus costos asociados, determinar los recursos necesarios, (personal, suministros y equipos) y establecer una organización adecuada para cumplirlo.

En el siguiente cuadro se realiza el detalle de tareas que se deben realizar a lo largo de toda la etapa de diseño del proyecto con los respectivos tiempos de realización en un caso optimista, pesimista y más probable. La unidad de medición es el “*día*”.

Letra	Nombre	T. Pesimista	T. más probable	T. Optimista
A	Estudio de mercado	13	9	8
B	Determinación del producto	12	10	9
C	Confección de especificaciones	6	4	3
D	Análisis de factibilidad	17	15	14
E	Determinación de las opciones existentes	13	11	7
F	Selección de alternativas	19	18	17
G	Planificación en detalle	5	3	2
H	Construcción del prototipo	23	20	17
I	Desarrollo de algoritmos	30	25	20
J	Validación del prototipo	17	9	6
K	Optimización del producto	13	12	10
L	Elaboración de documentación	25	21	17

Cuadro 7: Detalle de actividades

Detalle de las actividades:

- **(A) Estudio de mercado:** En esta etapa del proyecto se propone hacer un relevamiento de la disponibilidad y los precios de los pedales Wah Wahs que se consiguen en el mercado local. El objetivo de esta etapa es que sirva para determinar a groso modo la factibilidad económica del proyecto.
- **(B) Determinación del producto:** Esta etapa del proyecto consiste en realizar una encuesta con la que se tome conciencia de las necesidades del mercado y los requerimientos por parte de los potenciales clientes.
- **(C) Confección de especificaciones:** Aquí se deben tomar los requerimientos de los clientes y transformarlos en especificaciones realizables (no necesariamente técnicas) para comprobar en la instancia de validación del prototipo.
- **(D) Análisis de factibilidad:** Este análisis comprende todo lo referido a estudios de factibilidad para el proyecto; ya se de índole legal, financiera, de tiempos o tecnológica. Todas ellas deben asegurar la viabilidad del proyecto.
- **(E) Determinación de las opciones existentes:** Se debe realizar una profunda investigación acerca de las alternativas que existen para realizar el producto. Un adecuado estudio de patentabilidad en esta etapa puede ser necesario.
- **(F) Selección de alternativas:** De entre todas las variantes para el proyecto se debe optar por la más segura desde el punto de vista del riesgo económico, teniendo en cuenta una visión a corto, mediano y largo plazo.

- **(G) Planificación en detalle:** Realización del plan de trabajo hasta la finalización del prototipo, con su validación y documentación incluida.
- **(H) Construcción del prototipo:** Este paso comprende a todo lo referido a la primera materialización del producto, incluyendo a los tiempos estipulados para la adquisición de los componentes.
- **(I) Desarrollo de algoritmos:** Esta etapa puede y debe realizarse en paralelo a la construcción del prototipo. Al estar el proyecto prácticamente desacoplado entre el hardware y software, esto es una posibilidad que permite paralelizar tareas.
- **(J) Validación del prototipo:** En esta instancia se deben realizar las pruebas necesarias para demostrar que el prototipo construido cumple con las especificaciones establecidas al comienzo de la etapa de diseño.
- **(K) Optimización del producto:** La búsqueda constante por la autosuperación es una característica esencial para el triunfo comercial del producto que debe realizarse desde el momento que comienza la construcción del prototipo y nunca debe terminar. No obstante eso, se le asigna un período acotado de tiempo en el que se le invertirá capital humano a la optimización del prototipo, no para llevarlo a un producto comercial.
- **(L) Elaboración de la documentación:** La etapa final del proyecto consiste en volcar a un escrito todo el material para asegurar la repetitibilidad del mismo.

Asignando una probabilidad 4 veces mayor a que suceda el tiempo más esperado en cada una de las tareas se llega a los siguientes parámetros estadísticos, redondeandolos al entero superior.

Letra	Tiempo esperado	Desvio standard
A	10	1
B	11	1
C	5	1
D	16	1
E	11	1
F	18	1
G	4	1
H	20	1
I	25	2
J	10	2
K	12	1
L	21	2

Cuadro 8: Detalle de actividades

Teniendo en cuenta la dependencia de tareas, se puede elaborar el siguiente camino crítico (resultado respecto al camino no crítico):

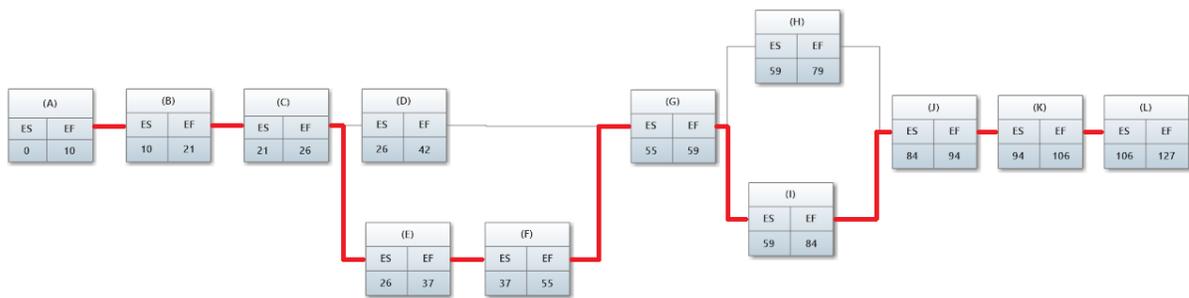


Figura 23: Camino crítico

Por lo tanto aplicando el teorema central del límite, se pueden elaborar las siguientes curvas de probabilidad, en las que se comprueba que la probabilidad de culminar el proyecto en 127 como indica el camino crítico es del 86,86 % , mientras que la probabilidad de terminarlo en 130 días es del 97,91 %. El proyecto no posee caminos semicríticos ya que la varianza de las tareas que no se encuentran en el camino no crítico no es suficiente para que estos se vuelvan críticos.

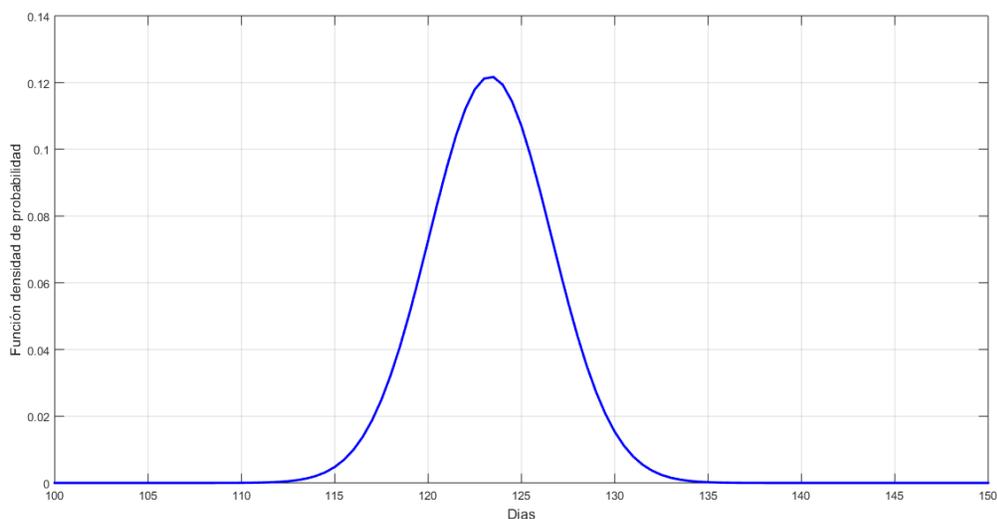


Figura 24: Duración total del proyecto en días.

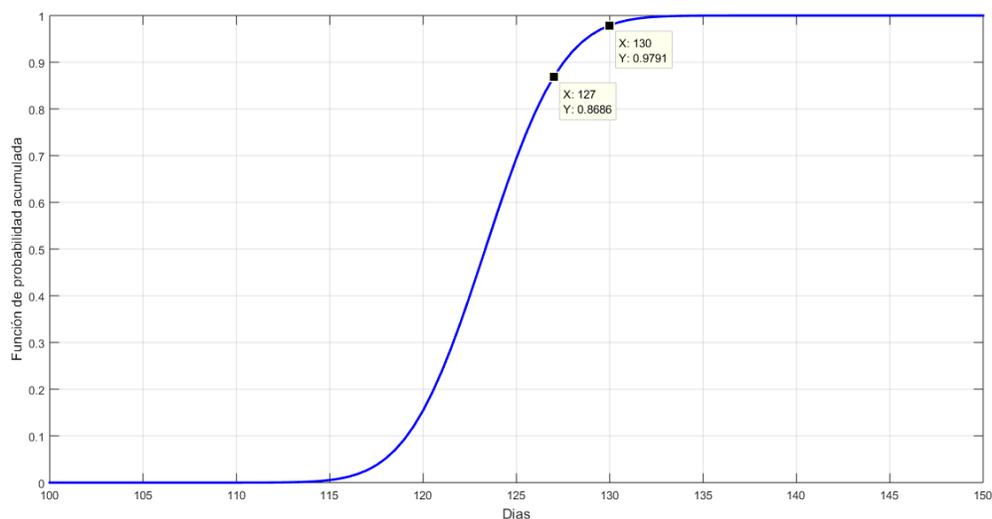


Figura 25: Probabilidad acumulada de la duración total del proyecto en días.

6.2.2. Simulación de Montecarlo

Para realizar esta simulación se asumió una distribución de probabilidad Beta en todas las tareas que se detallaron en el cuadro 8 con sus respectivos valores más probables, optimistas y pesimistas.

Se realizaron 100,000 simulaciones que se presentan en la siguiente figura y que sirvieron para darle un volumen estadísticamente significativo a la simulación de Montecarlo.

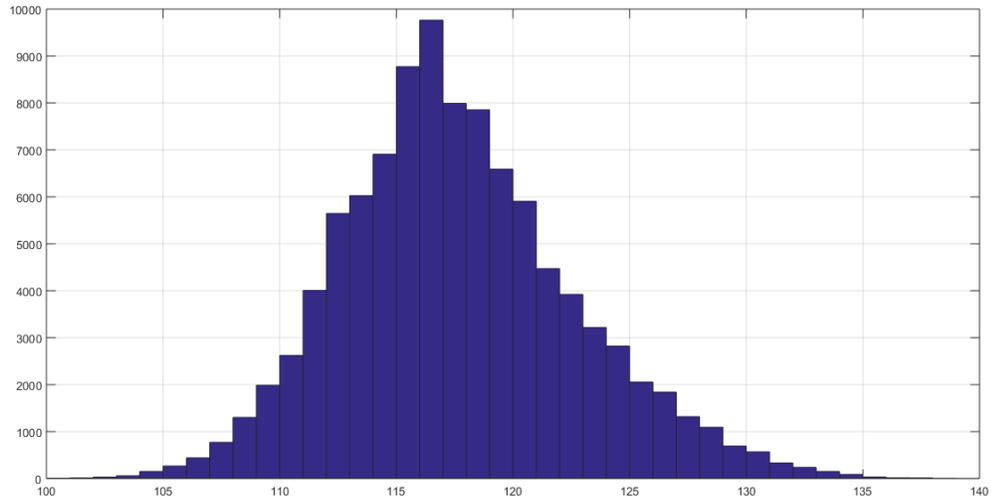


Figura 26: Simulación de Montecarlo para la ejecución de las tareas.

Se pudo comprobar que la factibilidad en tiempos de la realización del proyecto para el plazo previsto de 130 días es del 98 %.

6.2.3. Programación

Se propone determinar las actividades con sus respectivas prioridades, considerando el tiempo necesario y el personal responsable que las ejecutará.

El diagrama de Gantt de la figura 27 presenta la programación de las actividades del cuadro 8 con su duración estimada. En rojo se denota al camino crítico del proyecto.

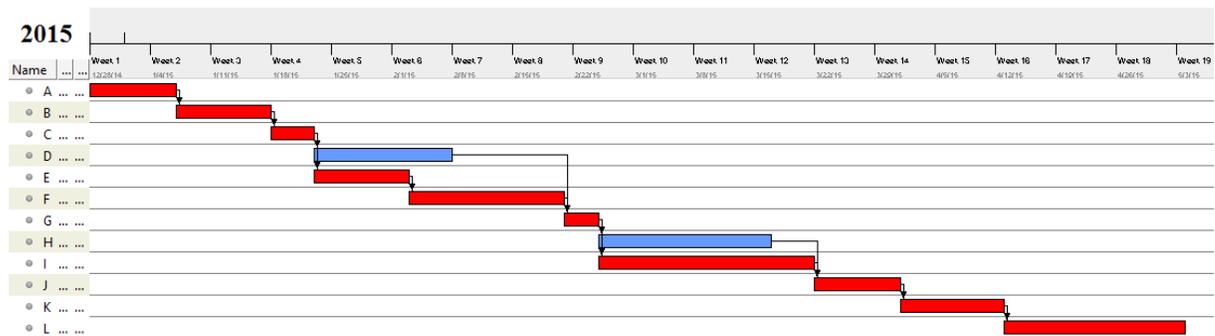


Figura 27: Diagrama de Gantt

Cada una de las actividades del proyecto debe ser realizada por uno o más integrantes del grupo (recurso humano). Los siguientes diagramas presentan para cada una de las actividades del Gantt anterior cómo será la división de tareas. Un color verde indica que la persona no dedica todo su tiempo, sino que lo hace en la proporción indicada, mientras que un color celeste representa que la persona dedica la totalidad de su tiempo.

Por ejemplo: para la tarea A, que según el diagrama de Gantt original (figura 27) su duración es desde el comienzo de la semana 1 hasta la mitad de la semana 2, Pablo dedicará el 50% de su tiempo en ella (ver el segmento verde de la figura 28a), mientras que Andrés le dedicará el 100% de su tiempo (ver el segmento celeste de la figura 28b).

Debe mencionarse que la fila correspondiente al nombre de cada uno de los integrantes ilustra el resumen a lo largo del tiempo de cada tarea. Por ejemplo: Gonzalo tiene a mitad de la semana 4 el comienzo de la actividad D (figura 28a), pero él asigna el 50% de su tiempo a esa tarea nada más. No obstante eso, él comienza a realizar la tarea F en la semana 6, también con un 50% del tiempo. De estas 2 tareas se observa fácilmente que hay una superposición de ellas en la semana 6, dónde él dedica el 50% de su tiempo a cada tarea, por lo tanto en la fila de “Gonzalo” se observa que al final de la semana 6 su dedicación al proyecto es del 100% y por eso aparece en celeste en lugar de verde.



(a) Pablo y Gonzalo



(b) Mauro y Andrés

Figura 28: Diagrama de Gantt de recursos. El objetivo de estos diagramas es observar la ocupación del tiempo a lo largo del proyecto de cada uno de los integrantes del grupo. La fila con los nombres de los integrantes resume su ocupación en las diversas tareas del proyecto.

6.3. Factibilidad económica

El propósito de esta sección es demostrar la viabilidad económica del proyecto y la rentabilidad que este puede producirle a los inversores interesados.

6.3.1. Relevamiento de la competencia

Tras un relevamiento de los precios de la competencia para modelos de Wah Wah se confeccionó el siguiente cuadro que resume los productos de las principales empresas del mercado. Los precios en Argentina fueron tomados de locales comerciales, es decir que incluyen impuestos aduaneros y el IVA.

Marca	Modelo	Precio en Argentina
Morley	CLW	U\$S 158,00
Vox	v847	U\$S 215,00
Cry-Baby	GCB95	U\$S 257,00
Fulltone	CWS	U\$S 501,00

Cuadro 9: Listado de precios de la competencia.

Debido a que el producto propuesto consta de una tecnología incipiente en el mercado, se debe tentar a los clientes con un precio menor al de la competencia.

Del relevamiento anterior se pudo establecer un precio objetivo de U\$S 180 (DOLARES CIENTO OCHENTA) para ser competitivos contra los productos que ya están instalados en el mercado.

6.3.2. Ventajas competitivas

Los Wah Wah comerciales que se encuentran en el mercado y cuyos precios fueron detallados en el cuadro precedente son a grandes rasgos muy parecidos entre sí pero cada uno tiene sus rasgos distintivos que se proceden a detallar.

Por ejemplo, los pedales Morley (figura 29a) son los más económicos del mercado pero según la opinión de los usuarios son los menos agradables estéticamente y por esta razón no son los más comprados (ver en la encuesta: “¿Cuánto pesa la estética del Wah Wah a la hora de comprarlo?”. Figura 5). En cuanto a sus características técnicas estos pedales tienen LEDs indicadores, utilizan un filtro con inductor y tienen la opción de ser energizados mediante una batería de 9V o bien con un transformador propio de Morley. Nuestra ventaja competitiva frente a estos pedales se apunta a que sea la estética ya que en cuanto a prestaciones planeamos cubrirlas todas.

Los pedales de Vox (figura 30b) son los más populares del mercado y constituyen el principal rival de nuestro producto. Según los usuarios, su estética es de las mejores del mercado y su relación precio-estética es la mejor. Técnicamente es similar al pedal de Morley salvo porque no posee indicación lumínica de funcionamiento y posee True By Pass. La otra diferencia es que su única fuente de energía son baterías de 9V. Esta característica será nuestra principal ventaja competitiva frente a estos pedales, además por supuesto de la ventaja del control inalámbrico y de un precio menor.

Los pedales de Cry-Baby (figura 30a) son levemente superiores en estética a los Vox según la opinión de lo usuarios. Un estrategia interesante de la empresa es que esta fabrica más de 10 pedales iguales donde lo único que cambia es la decoración de la carcasa entre ellos. En cuanto a sus características técnicas estas son idénticas a las del v847 de Vox. Nuestra ventaja competitiva frente a estos pedales es la misma que frente a los de Vox: la versatilidad en la energización y el control inalámbrico, además de un precio menor.

El pedal CLYDE Standard de Fulltone (figura 29b) es por lejos el más caro del mercado y el menos solicitado en Argentina. En cuanto a sus prestaciones es similar al pedal de Vox ya que posee un filtrado a base del característico inductor de los Wah Wah y una entrada para energización externa. Según la opinión de los usuarios, estos pedales son estéticamente más agradables, aunque su principal característica

y por la cual algunos están dispuestos a comprarlos es porque son la marca de pedales que usaron en su momento *Jimi Hendrix* y *Eric Clapton*. Nuestra ventaja competitiva frente a estos pedales será claramente el precio.



(a) Pedal Wah Wah de Morley: M2.



(b) Pedal Wah Wah de Fulltone: CLYDE Standard.

Figura 29: Pedales Wah Wah comerciales.



(a) Pedal Wah Wah de Cry-Baby: GCB95.



(b) Pedal Wah Wah de Vox: v847.

Figura 30: Pedales Wah Wah comerciales.

6.3.3. Detalle de costos

La construcción de un Wah Wah requiere los materiales que se especifican en el siguiente cuadro junto al detalle de sus respectivos costos⁴. El monto asciende a la suma de U\$S 69,32 (DOLARES SESENTA Y NUEVE CON VEINTICINCO) y comprende tanto al módulo receptor con las etapas de filtrado correspondientes como al transmisor. Para los cálculos de dichos costos no se ha contemplado la depreciación de los bienes de capital a pesar que forman parte del patrimonio propio, sino que se consideró que los mismos serán inservibles una vez cumplida su vida útil.

Item	Precio unitario	Cantidad	Subtotal
Resistores SMD	\$0.002	20	\$0.04
Resistores Through Hole 1%	\$0.020	20	\$0.40
Capacitores SMD	\$0.010	10	\$0.10
Capacitores Film	\$0.250	10	\$2.50
Diodos	\$0.210	1	\$0.21
LEDs	\$0.870	2	\$1.74
Transistores	\$0.850	2	\$1.70
Cristal	\$0.080	1	\$0.08
Inductor	\$5.000	1	\$5.00
LDO	\$1.800	1	\$1.80
Pote digital	\$3.200	1	\$3.20
Bluetooth HC06	\$6.500	2	\$13.00
Microcontrolador	\$2.100	2	\$4.20
IMU	\$9.000	1	\$9.00
Conector polarizado	\$0.060	10	\$0.60
Jack de audio	\$1.400	2	\$1.75
PCBs tercerizados	\$3.500	1	\$3.50
Estaño 60/40	\$1.000	1	\$1.00
Pila CR2032	\$1.000	1	\$1.00
Portapila	\$0.200	1	\$0.20
Switch Rx	\$0.250	1	\$0.23
Gabinete Rx	\$9.000	1	\$9.00
Gabinete Tx	\$6.000	1	\$6.00
Packaging	\$3.000	1	\$3.00
Total			\$69.25

Figura 31: Detalle de los costos de materiales de un Wah Wah.

Página Web: Se debe confeccionar una página web para darle mayor presencia en redes sociales al producto y ser capaz de llegar a nuevos clientes dándole una estructura comercial al emprendimiento. El costo de la página web es de U\$S 200 una primera vez para su diseño y luego su mantenimiento anual es de U\$S 50, que se considera prorrateado en cada mes dentro de los costos de Marketing.

Marketing: Los costos de marketing comprenden la difusión en redes sociales como Facebook U\$S 1,00 (DOLAR UNO) por día y Youtube U\$S 0,20 (DOLARES CERO CON VEINTE) por video visto. Se destinarán U\$S 30,00 (DOLARES TREINTA) al mes en Facebook y U\$S 70,00 (DOLARES SETENTA) por mes en Youtube. Además se suma el prorrateo del costo de mantenimiento del dominio web en nic.ar y se deja un margen para eventuales publicidades en medios gráficos (por ejemplo: los 30cm² de

⁴La vigencia de los costos detallados es hasta Diciembre de 2016 inclusive.

publicidad en una hoja interna del diario Perfil tienen un costo aproximado de U\$S 300: DOLARES TRESCIENTOS).

Diseño industrial y gráfico: Tal cual se reveló en la encuesta realizada, la estética de los pedales es sumamente importante. Por esta razón, se contempla en el proyecto la contratación por única vez de un diseñador industrial y uno gráfico para que confeccionen un gabinete, un diseño artístico y un packaging acorde a lo que los clientes esperan. Eventualmente en alguna etapa futura del proyecto esto puede ser reconsiderado.

Espacio físico: La inversión en espacio físico es considerado para el proyecto como el alquiler de un departamento monoambiente. Se estima abonar un alquiler mensual de U\$S 300 (DOLARES TRESCIENTOS). El primer mes entre comisión (2 alquileres) y reserva, se deberán abonar 4 meses.

Impuestos: En cuanto a los factores impositivos se ha considerado el impuesto a los ingresos brutos (3%), la diferencia entre el IVA de compra y venta (21%), impuesto al cheque del 1,2% (por las transferencias de sueldos) y el impuesto a las ganancias (35%). En cuanto a las cargas sociales estas son el 54% de los sueldos netos de los empleados (reducción del 17% debido a aportes jubilatorios, ley N°19032 y obra social).

Mercado potencial: Se han estimado un total de 350 casas de música en CABA y GBA, teniendo en cuenta que cada una puede vender hasta 3 pedales por mes, se llega a que el mercado potencial es de 1050 Wah Wahs por mes. Y siendo el Share el 25% del mercado potencial, se llega a que éste es de 250 Wah Wahs al mes. Los pronósticos tendrán esta cota superior en la cantidad de ventas.

Excedente Máximo	Excedente mínimo	Porcentaje
\$ 833.00	\$ 1.00	9%
\$ 1,666.00	\$ 834.00	14%
\$ 2,500.00	\$ 1,667.00	19%
\$ 5,000.00	\$ 2,501.00	23%
\$ 7,500.00	\$ 5,001.00	27%
\$ 10,000.00	\$ 7,501.00	31%
∞	\$ 10,001.00	35%

Figura 32: Escalas del impuesto a las ganancias que corre por cuenta de los empleados.

6.3.4. Modelo de negocios

Para la construcción del Wah Wah como producto comercial se va a formar una sociedad de hecho (SH). Las ventajas de este tipo de sociedades frente a una sociedad de responsabilidad limitada (SRL) o una sociedad anónima (SA) es que en el caso de las primeras tienen menores gastos administrativos, no demanda gastos de inscripción en la IGJ (sólo requiere inscripción en AFIP y la generación del CUIT con la presentación del documento de los socios). Entre las desventajas de una SH se pueden destacar las más importantes:

- Dificil acceso al financiamiento: Como no se requieren enormes capitales de inversión esto no será un problema
- Imposibilidad de bienes a nombre de la SH: No cambia nada.
- Responsabilidad ilimitada y solidaria: Al no poseer personalidad jurídica, los socios son responsables ilimitados y solidarios frente a las deudas de la organización. Los acreedores pueden accionar contra la sociedad en un principio, o contra cualquiera de los socios de forma indistinta, respondiendo éstos con todo su patrimonio si fuera necesario. Como no se planea incurrir en créditos ni deudas con acreedores, esto no será un problema.

Por otro lado, el proceso de fabricación de los PCBs se ha decidido tercerizarlo a empresas extranjeras que se dedican a su elaboración. De esta forma se puede prescindir de todos los materiales a costa de inscribir a la SH como importador. Para la declaración de la sociedad como importadora se debe realizar un depósito que garantice solvencia económica o bien acreditar a través de sus ventas brutas por un importe no inferior a PESOS TRESCIENTOS MIL (\$ 300.000) en el año calendario inmediato anterior o a través de un patrimonio neto de igual monto. Por lo tanto en el flujo de fondos se considerará esta inversión de *U\$S 2000 (DOLARES DOS MIL)*.

El precio de venta del Wah Wah será de *U\$S 180 (DOLARES CIENTO OCHENTA)*, siendo sus costos *U\$S 70 (DOLARES SETENTA)*.

En cuanto a la mano de obra esta será aportada por los integrantes del grupo, de modo que los costos asociados a ella estarán dentro de los sueldos. El detalle de los roles de los integrantes del equipo, que trabajaran en relación de dependencia de la SH es el siguiente:

- Construcción y ensamblado de los productos: **Mauro Padín** y **Andrés Bersier**
- Control de calidad de los productos entrantes y salientes: **Gonzalo Rizzo**
- Ventas y Marketing: **Pablo Gardella**

Los sueldos serán de *U\$S 1500 (DOLARES MIL QUINIENTOS)* al mes, salvo los primeros 18 meses, donde serán de un 80 % de ese valor, es decir *U\$S 1200 (DOLARES MIL DOSCIENTOS)*. El impuesto a la ganancia mínima presunta⁵ no aplica (al menos para esta etapa del proyecto). Además la TREMA es del 31,25 % y se obtuvo de la tasa ofrecida en pesos por el banco ICBC e Itaú, ambos en Argentina.

⁵El impuesto a la ganancia mínima presunta es aplicable en todo el territorio de la República Argentina, y se determina sobre la base de los activos.

Los bienes del activo gravado en el país cuyo valor en conjunto, determinado de acuerdo con las normas de la ley del impuesto, sea igual o inferior a \$200.000, se encuentran exentos. Cuando el valor de los bienes supere la suma mencionada, quedará sujeto al gravamen la totalidad del activo gravado del sujeto pasivo del tributo.

6.3.5. Flujo de fondos

Entonces según los datos anteriores se elabora el cuadro de resultados que puede ser encontrado en el anexo financiero y conduce a los siguientes gráficos:

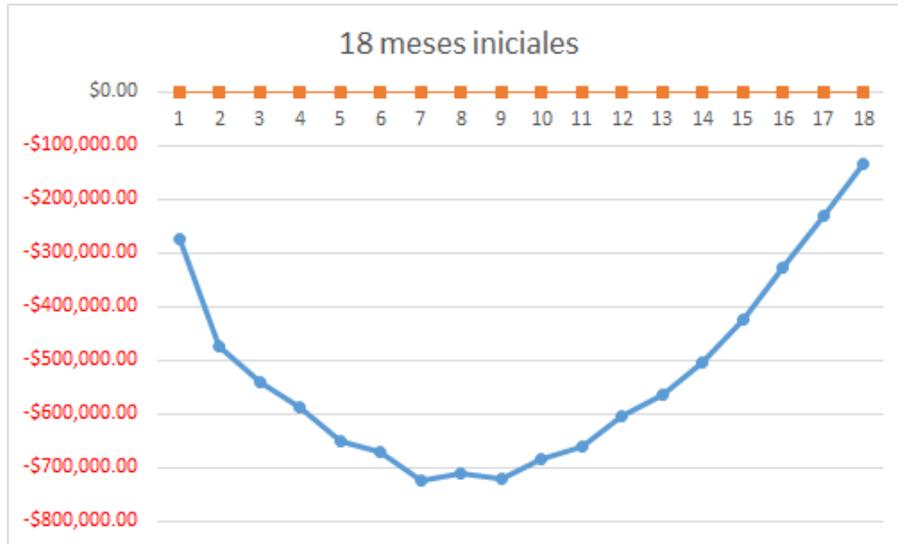


Figura 33: Flujo de fondos mensuales del proyecto para los primeros 18 meses.

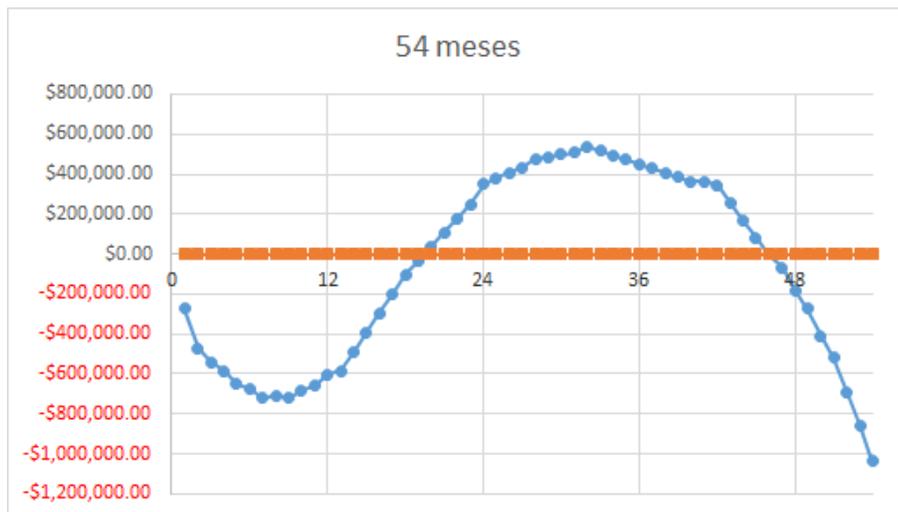


Figura 34: Flujo de fondos mensual del proyecto en 5 años.

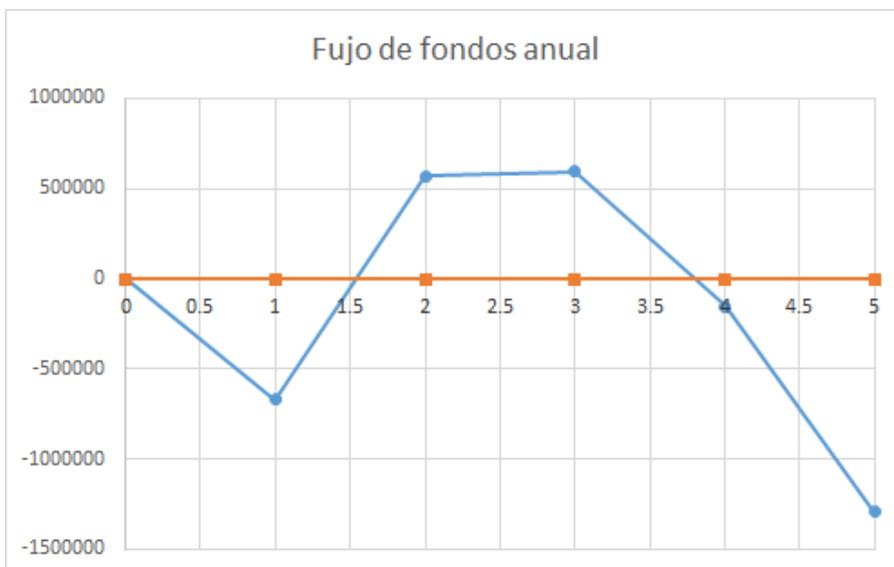


Figura 35: Flujo de fondos año a año del proyecto durante 5 años.

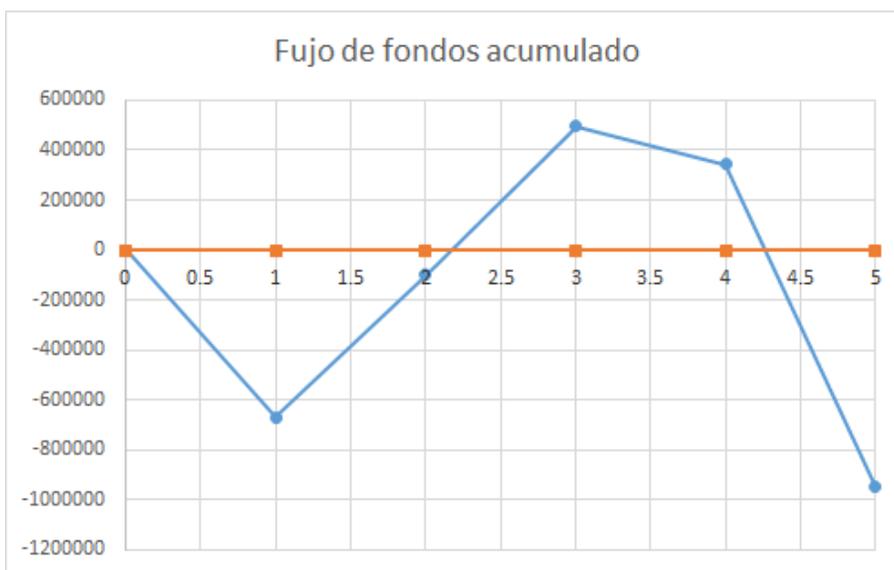


Figura 36: Flujo de fondos anuales acumulados del proyecto en 5 años.

Del cuadro de resultados que puede ser encontrado en los anexos, y de los gráficos anteriores surge que el VAN del proyecto y su TIR pueden adoptar un valor distinto según la duración del mismo. En la siguiente tabla se los presenta. La TREMA empleada es del 31,25 % anual⁶ y el período de repago es de 20 meses.

⁶Tasa ofrecida en pesos por el banco ICBC e Itaú.

Duración	3 años	4 años	5 años
VAN	\$ 64,803.44	\$ 13,459.73	- \$318,756.04
TIR	42.53 %	33.89 %	X

Cuadro 10: Valor Actual Neto del proyecto con distintas duraciones.

Del análisis presentado en esta sección se destaca que el proyecto a 3 años además de tener un bajo valor de VAN desde el punto de vista de la rentabilidad (las ganancias se deben dividir por 4), tiene también una altísima exposición financiera porque el saldo negativo durante los primeros 18 meses es tan grande en magnitud como el mayor pico que presenta el emprendimiento en el mes 33, cuando se alcanza el apogeo del proyecto. Además, en los meses de mayor crecimiento se cuenta con que se alcancen todas las ventas posibles en el mercado, es decir, las 250 unidades al mes (ver anexo financiero). Por otra parte, resulta claro que el proyecto por si solo no puede extenderse por 5 años ya que su ciclo de vida hace que las ventas para ese entonces no sean las suficientes para sostener el emprendimiento (figura 35). Con esto se concluye que el producto no es recomendado para ser lanzado por si solo, aunque si puede ser el puntapie inicial dentro de una línea de productos para músicos donde se lance un nuevo producto cuando este empiece a cumplir su ciclo y así sucesivamente con los nuevos productos. O bien, puede ser un proyecto más rentable para alguna empresa que ya se encuentre asentada en el mercado y no tenga que afrontar todos los costos fijos e iniciales que este proyecto tiene (marketing, derechos de importación, espacio físico, bienes de uso, etc).

6.4. Factibilidad legal y responsabilidad civil

Para determinar la factibilidad legal del producto de acuerdo a las normas especificadas por el Gobierno Nacional, se estudian las certificaciones necesarias a cumplir basándose en las regulaciones vigentes en cuanto a productos electrónicos y musicales. Según se estudió, el producto cae en el marco de la resolución 92/98.

6.4.1. Requisitos de productos eléctricos (92/98)

Para analizar los requisitos eléctricos que debe cumplir el producto, se basó el estudio en la resolución 92/98⁷ que determina los requisitos esenciales de seguridad que debe cumplir el equipamiento eléctrico de baja tensión para su comercialización.

Según el Artículo 2, dicha resolución es válida para artefactos, aparatos o materiales eléctricos destinados a una instalación eléctrica o formando parte de ella, que tenga una tensión nominal de hasta MIL (1000) Volt en corriente alterna eficaz o hasta MIL QUINIENTOS (1500) Volt en corriente continua.

Según el Artículo 3 se puede obtener una certificación de seguridad de producto, otorgada por un organismo de certificación acreditado por el Organismo Argentino de Acreditación (O.A.A.) conforme con el Decreto N° 1474/94. Pero según el Artículo 1 del decreto 1474/94, la certificación sistemas de calidad, productos, servicios y procesos será de cumplimiento voluntario para un producto como el propuesto, y se ha decidido no cumplirlo.⁸

⁷2. PRESUPUESTO 2.1. El Organismo de Certificación analiza la solicitud del postulante, para asegurar que los requisitos de la certificación están claramente definidos y comprendidos, que se haya resuelto cualquier tipo de diferencias entre el postulante y el Organismo de Certificación además de establecer los requerimientos de ensayos e inspecciones necesarios y la posibilidad de su desarrollo. 2.2. Una vez realizado el análisis de la solicitud de certificación y si el mismo es satisfactorio se procederá a realización del presupuesto correspondiente.

⁸Artículo 1º — Créase el Sistema Nacional de Normas, Calidad y Certificación destinado a brindar instrumentos confiables a nivel local e internacional para las empresas que voluntariamente deseen certificar sus sistemas de calidad, productos, servicios y procesos a través de un mecanismo que cuente con los organismos de normalización, acreditación y certificación, integrados de conformidad con las normas internacionales vigentes. Las normas que deriven del sistema creado serán de cumplimiento voluntario.

Anexo I

El Anexo I indica las condiciones generales a cumplir, la protección contra los peligros originados en el propio equipamiento eléctrico y la protección contra los peligros causados por efecto de influencias exteriores. Todas estas normativas son las normas básicas que todo aparato eléctrico debe cumplir.

Anexo II

El Anexo II indica los procedimientos y plazos para la certificación de un producto. En primer lugar, este anexo establece que debe presentarse ante la Dirección Nacional de Comercio Interior una certificación de producto de marca de conformidad otorgada por un organismo de certificación acreditado por la O.A.A.

Hay TRES (3) etapas para la certificación de un producto regido por la resolución 92/98. La primera consiste en presentar ante la Dirección Nacional de Comercio Interior una declaración de conformidad del producto con los "requisitos esenciales de seguridad del equipamiento eléctrico de baja tensión". La declaración debe basarse en ensayos o evaluaciones documentados por el productor o terceros y los mismos deben dar confianza en que el producto ofrecido cumple con los requisitos mencionados.

La segunda etapa consiste en presentar ante la DIRECCION NACIONAL DE COMERCIO INTERIOR una Certificación de Conformidad de Tipo para los Requisitos Esenciales de Seguridad otorgada por un organismo de certificación acreditado ante O.A.A y reconocido por el Gobierno Nacional. Esta certificación es por el término de un año.

En la tercera etapa se deberá contar con un certificado de producto por sistema de marca de conformidad siguiendo un sistema como el indicado en la Guía ISO/IEC 28 (IRAM 354) otorgada por un organismo de certificación acreditado ante el O.A.A.

Otras Resoluciones

Se derogó la resolución S.C. 334/84 para Aparatos Electrónicos y Similares y las únicas resoluciones vigentes son para Refrigeradores y para Aparatos de Clase I y II. Ya que el producto trabaja con baterías de 9V, no aplica para Clase I ni II, por lo que no hay que atenerse a lo que diga ninguna resolución extra.

No se encontró ninguna resolución que tratara el tema de fabricación de pedales de guitarra por lo que se tendrá en cuenta lo tratado en la resolución 92/98.

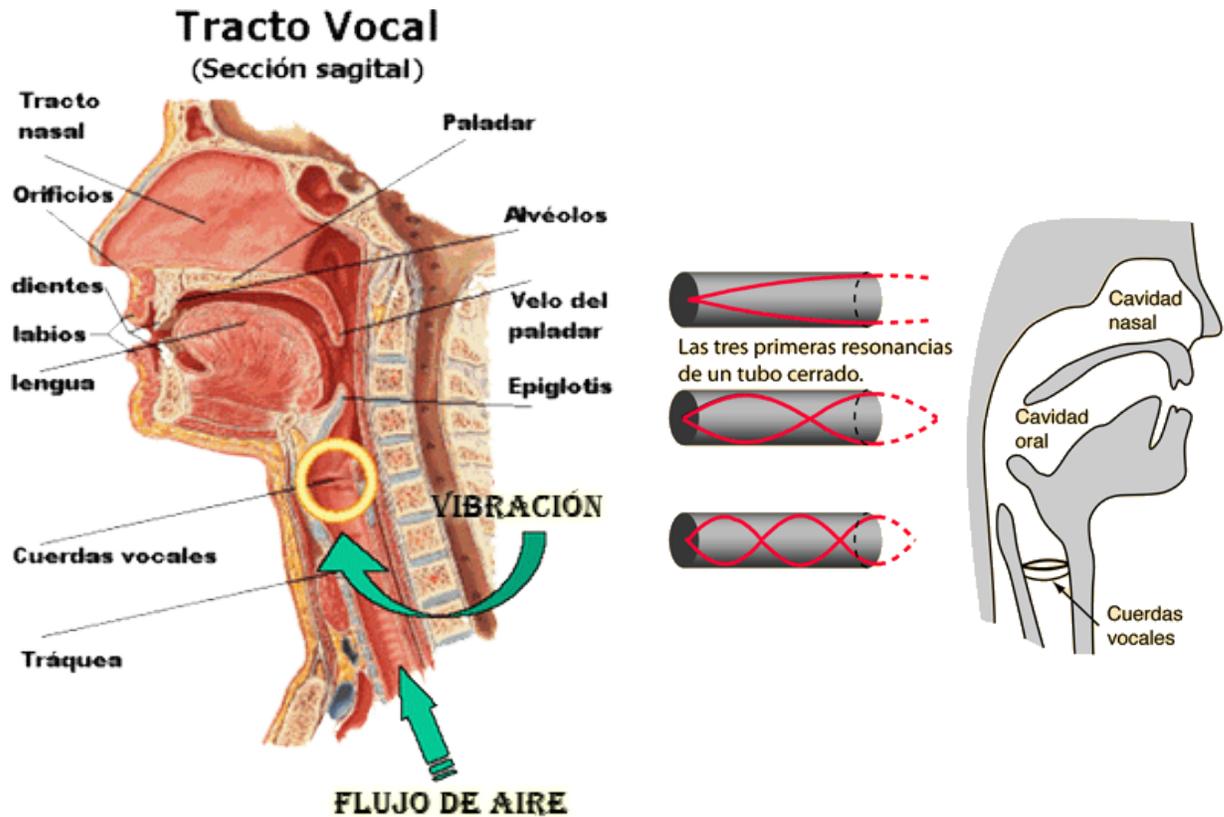
6.4.2. Compatibilidad Electromagnética

Ya que se utilizará un módulo de comunicación inalámbrica Bluetooth, se deben cumplir con los requisitos de Compatibilidad Electromagnética (EMC) que comprende la Emisión o Interferencia Electromagnética (EMI) y la Inmunidad o Susceptibilidad Electromagnética (EMS). Se debe conseguir un módulo que se encuentre certificado para no incurrir en gastos de certificación.

7. Ingeniería de detalle

7.1. Fonética

Para comprender las características psicoacústicas que le dan nombre a los pedales Wah Wah[9], primero deben abordarse ciertos temas anatómicos relacionados con la fonética⁹ y la acústica del tracto vocal, presentado en la siguiente figura que ilustra la sección sagital¹⁰ del tracto vocal.



(a) Sección sagital del tracto vocal.

(b) Distintas formantes en el modelo de tubo cerrado.

Figura 37

Las cavidades faríngea, nasal y oral pueden ser modeladas como una sucesión de resonadores de tubos cilíndricos, donde cada uno está caracterizado por una frecuencia de resonancia, que en fonética se denomina *formante*.

Desde un punto de vista espectral, las formantes son aquellas frecuencias para las cuales el espectro del sonido presenta un máximo. Un sonido producido por la voz humana suele tener al menos 3 formantes que lo caracterizan. Los humanos para oír se basan principalmente en las primeras 2 formantes para reconocer al sonido. Es por esto que se pueden construir gráficos como el que se presenta en la figura 38, en donde las vocales son mapeadas en un plano según sus primeras 2 formantes.

⁹La fonética es la rama de la lingüística que estudia la producción de los sonidos de un lenguaje a nivel físico.

¹⁰Sección sagital: Los planos o secciones sagitales son en anatomía aquellos planos, perpendiculares al suelo y en ángulo recto con los planos frontales, que dividen al cuerpo en mitades izquierda y derecha.

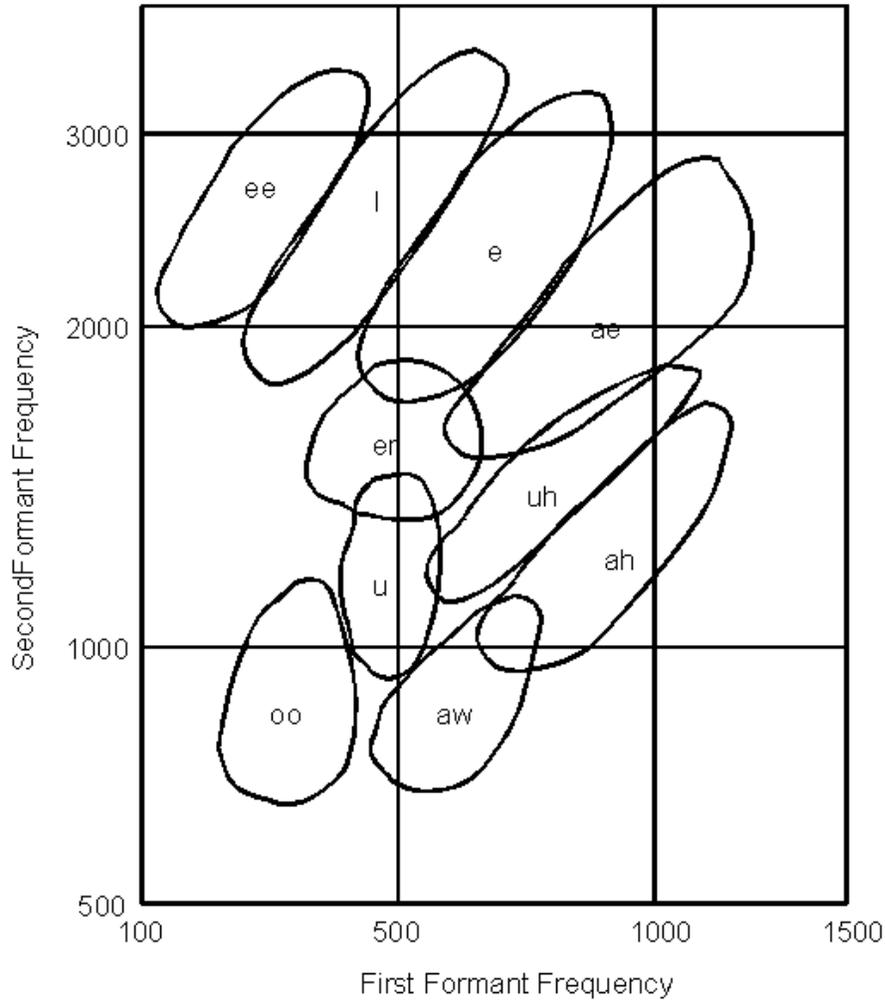


Figura 38: La posición relativa de los primeros 2 formantes permite codificar los sonidos vocales en un diagrama difusa.

Estos gráficos son construidos según estudios de psicoacústica a cientos de personas, por lo tanto no existen límites tajantes, sino una difusión desde la zona de una vocal hasta la zona de su aledaño. Nótese que los sonidos “Aw” y “Ah” son los que se encuentran más cerca de la recta $y = x$.

Por otro lado, los pedales Wah Wah comerciales tienen en un extremo del rango de trabajo, a su frecuencia de paso entre 500 y 1200 Hz, esto coincidiría con las vocales que se encuentran a la derecha del diagrama, sin embargo, falta la segunda formante para poder determinar a qué sonido más se asemeja. No obstante, el filtro pasabanda tiene cierto ancho de banda que permite la presencia de señales con frecuencia cercanas. Este hecho pasaría inadvertido y no produciría un sonido vocal si no fuera porque *la distorsión que introduce un filtro temporalmente variable colorea el espectro de la señal de entrada*. Por lo tanto cuando el pedal se encuentra en una zona del espectro y se mueve el filtro, el sonido que se escucha corresponde a la zona más cercana a la recta $f_2 = f_1$, ya que por el fenómeno de coloreo mencionado y que ahora se demuestra, aparecerá una nueva formante de frecuencia similar a la original.

Una forma de entender este hecho matemáticamente es considerando que el apriete del pedal es una modulación en amplitud de la nota que esté reproduciendo la guitarra. Asumiendo que la modulación del músico es del tipo sinusoidal con frecuencia ω_1 y cercana a los $2\pi \cdot 3Hz$ se puede demostrar que se obtienen al menos 3 tonos. Los cuales, pueden ser enmascarados dependiendo de la frecuencia del pasabanda, y eso determinará si el sonido es un “Aw” o un “Ah”.

Ahora bien, sea sin pérdida de generalidad una excitación de la forma $x(t) = A \cdot \sin(\omega_0 t)$ que

es aplicada a un potenciómetro cuyo punto medio varía según: $y(t) = \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos(\omega_1 t))$, entonces la modulación resultante (o batido) está dado por la siguiente expresión, donde m es el índice de modulación que va de 0 a 1 e indica si se llega a los extremos del potenciómetro. Un valor de 0 se corresponde con el potenciómetro en su punto medio.

$$x(t) \cdot y(t) = \frac{A}{2} \cdot \sin(\omega_0 t) \cdot (1 + m \cdot \cos(\omega_1 t)) \quad (1)$$

Este enfoque es válido porque en el circuito del Wah Wah, seguido al potenciómetro hay un transistor en configuración seguidor por emisor (buffer de tensión), por lo tanto las siguientes etapas no cargan al potenciómetro.

La expresión anterior puede ser reescrita haciendo uso de identidades trigonométricas¹¹ para llegar a la siguiente ecuación, la cual coincide con una modulación AM con portadora y ambas bandas laterales.

$$x(t) \cdot y(t) = \frac{A}{2} \cdot \sin(\omega_0 t) + \frac{Am}{4} \cdot \sin((\omega_0 + \omega_1) t) + \frac{Am}{4} \cdot \sin((\omega_0 - \omega_1) t) \quad (2)$$

Nótese que para valores típicos: $\omega_0 = 2\pi \cdot 500 \text{ Hz}$ y $\omega_1 = 2\pi \cdot 3 \text{ Hz}$ se supera la diferencia mínima perceptible por el oído humano (aproximadamente un 0,5% de la frecuencia del tono[11], lo cual sería $500 \text{ Hz} \cdot \frac{0,5}{100} = 2,5 \text{ Hz}$) y es aceptable que se escuchen un sonido con predominancia de formantes en vez de un tono único.

¹¹La identidad usada es la siguiente: $\sin(x) \cdot \cos(y) = \frac{1}{2} (\sin(x+y) + \sin(x-y))$

7.2. Hardware

En esta sección se describirá el detalle de todo lo relacionado al hardware del proyecto. Esto abarca tanto al diseño del receptor y del transmisor con todos sus bloques funcionales internos.

7.2.1. Diagramas en bloques

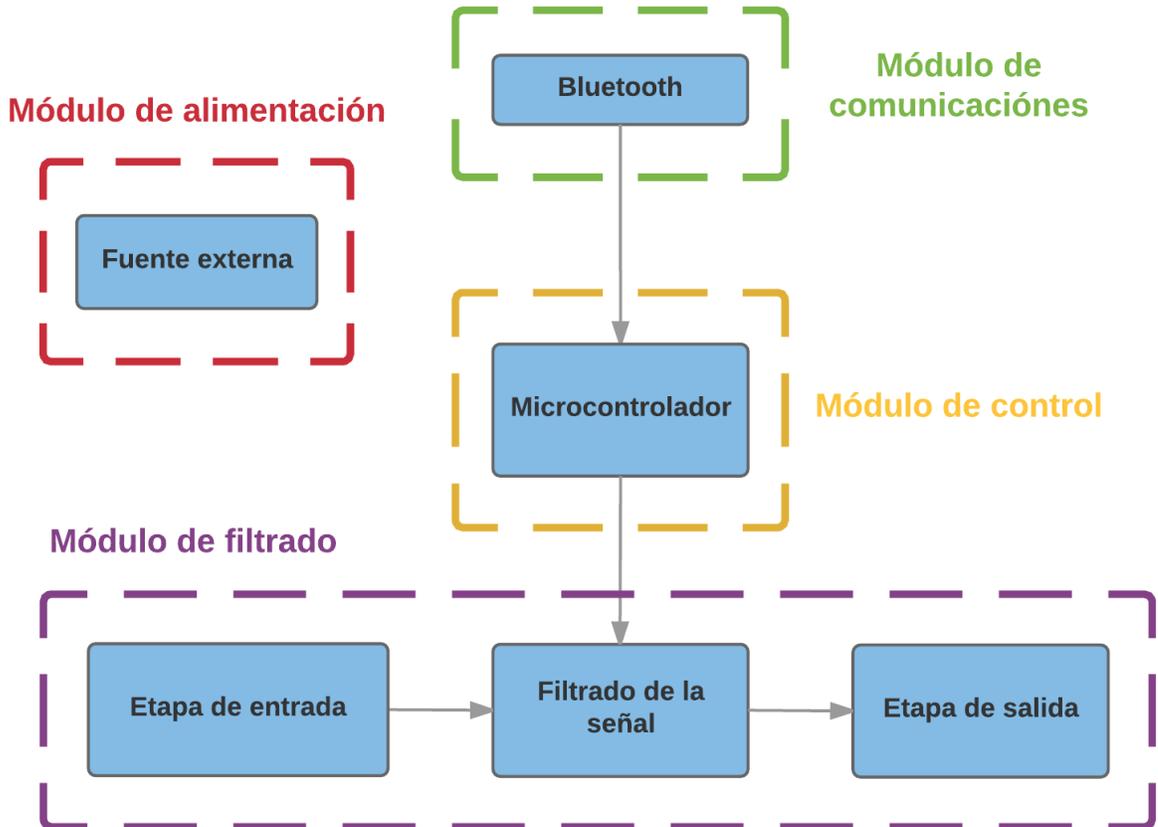


Figura 39: Diagrama en bloques de los módulos principales del receptor.

Receptor Tal cual se ilustró en la figura anterior, el receptor comprende los siguientes 4 grandes bloques funcionales:

- **Módulo de alimentación:** Este bloque es el encargado de energizar al sistema. Este bloque recibirá como entrada 9V que provienen de una fuente externa al Wah Wah y se encargará de convertir este nivel de tensión en los necesarios para el resto de los módulos. Los cuales son de 3.3V para el módulo Bluetooth y los mismos 9V para el módulo de filtrado.
- **Módulo de comunicación:** Este módulo será el encargado de recibir la información angular para comandar al potenciómetro que da origen al efecto del Wah Wah. La comunicación con el microcontrolador será por medio de un protocolo UART.
- **Módulo de control:** El módulo de control se compone del microcontrolador. Su función es la de recibir la información desde el módulo de comunicación y convertirla en la señal de control que el potenciómetro digital requiere para controlar el filtro analógico mediante SPI. El detalle del firmware se explicará en la sección dedicada al software (sección 7.3).

- **Módulo de filtrado:** Esta etapa es la que realiza el procesamiento de la señal a partir de la información suministrada por el microcontrolador. La función de este módulo es la de ser un filtro pasabanda cuya frecuencia de paso responda al valor de la resistencia definida por el potenciómetro digital. A su vez, se requiere que esta etapa no cargue a la guitarra porque se pueden perder notas y ganancia (esta es la razón de ser de la etapa de entrada) y se acople bien al amplificador que siga en el camino de la señal (etapa de salida), por las mismas razones.

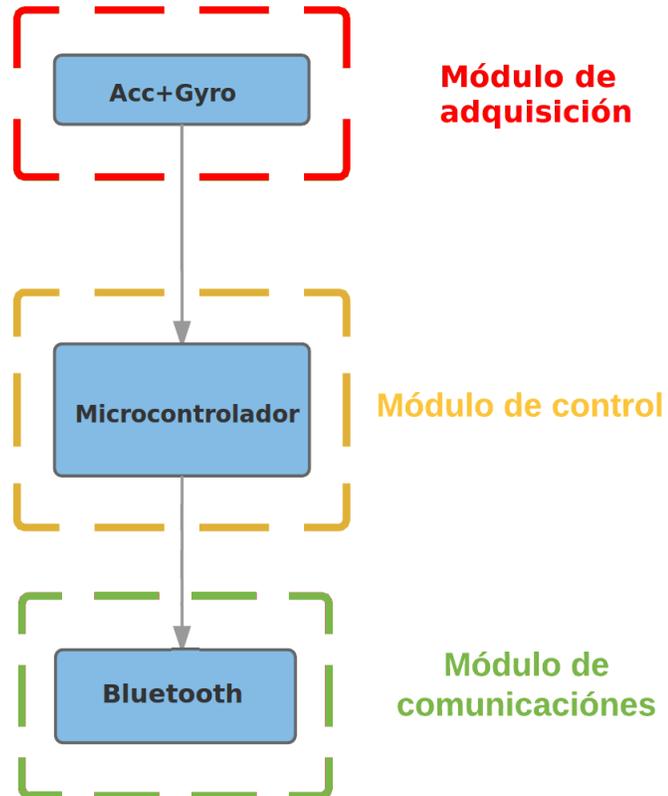


Figura 40: Diagrama en bloques de los módulos principales del transmisor.

Transmisor El transmisor comprende los siguientes 4 grandes bloques funcionales:

- **Módulo de alimentación:** Este bloque es el encargado de energizar al sistema.
- **Módulo de adquisición:** Este bloque es el encargado de medir
- **Módulo de control:** Este módulo se encarga de adecuar la señal proveniente del módulo de adquisición para luego ser enviada.
- **Módulo de comunicación:** Este módulo será el encargado de transmitir la información angular para comandar al potenciómetro que da origen al efecto del Wah Wah.

El módulo de control toma los datos del módulo de adquisición y los envía al transmisor utilizando el módulo de comunicación.

7.2.2. Detalles de diseño

En esta sección se detallarán cada uno de los bloques y se justificará la elección de los componentes necesarios.

Módulo de alimentación

Receptor En concordancia con lo planteado en el DFMEA, el módulo de alimentación debe contemplar errores de conexión por parte de usuario. Es por esto que se ha decidido constructivamente emplear un diodo de protección para preservar la integridad del circuito ante posibles inversiones de polaridad en la conexión de la eventual batería (el Wah Wah será diseñado para que trabaje con una fuente externa, pero contempla el uso de batería como fuente de energía).

El circuito que se propone para el módulo de alimentación es el de la siguiente figura y el cálculo de componentes se presenta a continuación.

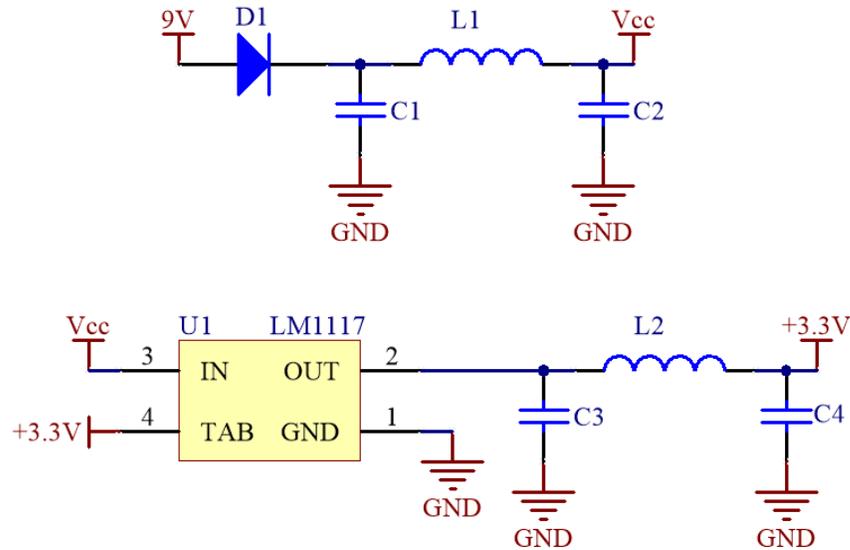


Figura 41: Módulo de alimentación del receptor.

En cuanto al cálculo de los componentes se puede decir lo siguiente:

- Diodo D1: Debido a las relativamente bajas corrientes que demandan los módulos del circuito se empleará un diodo rectificador 1N4007, cuya corriente máxima promedio en directa es de 1A y en inversa es capaz de soportar hasta 1000V.
- Inductores L1 y L2: Por cuestiones no técnicas relacionadas con la disponibilidad en el mercado y la limitación a las importaciones se ha decidido utilizar un inductor SMD de $10\mu H$.
- Capacitores C1 y C3: Estos capacitores son los que definen al filtro pasabajos de segundo orden en conjunto con sus respectivos inductores[10]. La frecuencia de los polos viene dada por $f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$. Se desea tener una atenuación de por lo menos 40 dB a 2,4 GHz debido a que esta es la frecuencia de trabajo del Bluetooth. Para conseguir esto, dada la imposición de la inductancia, la frecuencia del polo está dada por:

$$f_p < \frac{2,4GHz}{10^{40/20} - 1} \cong 25 kHz \quad (3)$$

Lo cual conduce a un valor de capacidad C acotado por:

$$C > \frac{1}{4\pi^2 f_p^2 L} \cong 4,3\mu F \quad (4)$$

Por lo tanto se decide utilizar un valor comercial de $10\mu F$ en tecnología cerámica ya que los capacitores electrolíticos no son apropiados para filtrar altas frecuencias debido a su inductancia parásita. Con este valor de capacitor, el polo se ubica en $15,91\text{ kHz}$, por lo tanto la atenuación en $2,4\text{ GHz}$ será de $-43,6\text{ dB}$.

- Capacitores C2 y C4: Estos capacitores deben ser de un valor considerablemente menor a los otros ya que su función es la de desacoplar, es decir proveer un camino local de retorno a masa. Además deben ser de una tecnología diferente a la electrolítica, por lo tanto se decidió utilizar capacitores cerámicos multicapa (MLCC) de 100 nF .
- Integrado U1: El integrado que se requiere es un regulador de $3,3\text{ V}$. Se decidió utilizar el *LM1117* porque es un integrado ampliamente disponible en el mercado local.

Transmisor En el caso del transmisor, el módulo de alimentación no cuenta con reguladores ya que se alimenta mediante una pila de litio de 3 V . En este caso sólo se trabaja con señales digitales por lo que no se requiere aislar masas.

Módulo de comunicación Tal cual se explicó en el análisis de factibilidad legal, para no incurrir en costos de certificación de compatibilidad electromagnética se recurrió a utilizar un módulo comercial de comunicación Bluetooth tanto para el receptor como para el transmisor. Este módulo es el HC-05 y se presenta una ilustración del mismo en la siguiente figura.

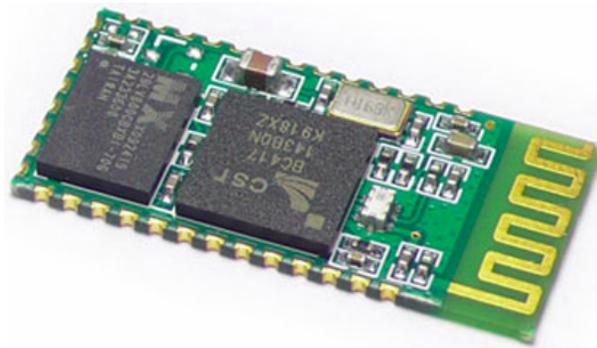


Figura 42: Módulo de comunicación Bluetooth HC-05.

En cuanto al hardware de este módulo sólo basta con detallar su esquemático. El mismo ilustra en la siguiente figura y se observa que se compone simplemente de conexiones en los pines 1 y 2 a los canales de comunicación UART con el microcontrolador y en los pines 24 y 26 la interfaz de botones y LEDs con el usuario.

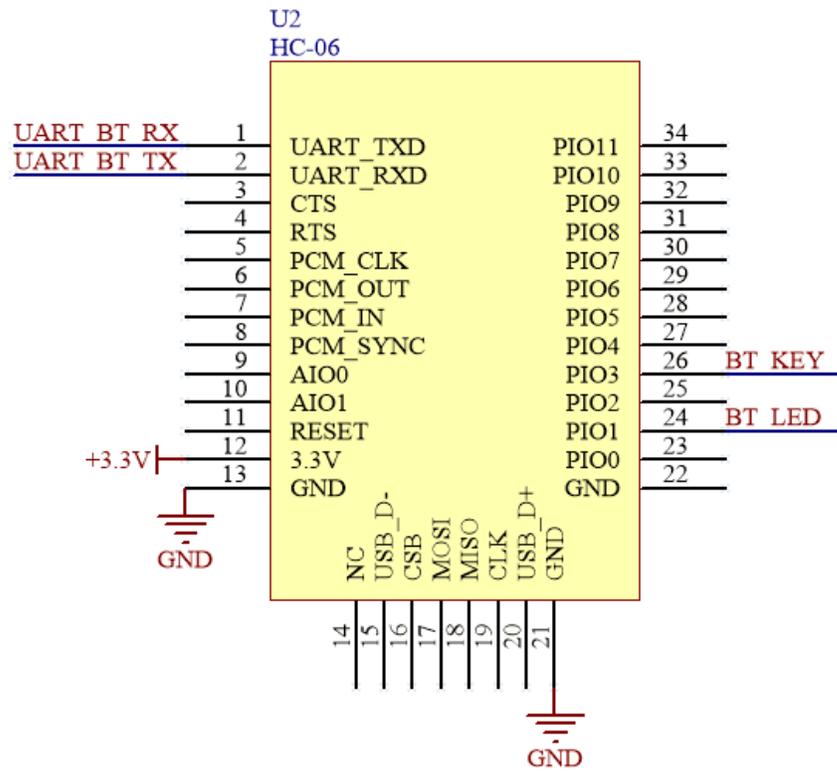


Figura 43: Esquemático de conexión del módulo Bluetooth

Módulo de filtrado En primer lugar, y tal cual se planteo en el analisis de factibilidad tecnológica de la sección 6.1.1, se analizarán las alternativas posibles para cumplir con el filtrado que se requiere.

1. *Filtro con transistores e inductor*: Se realizó un estudio del circuito de *Vox* para comprender su funcionamiento (se lo vuelve a ilustrar para mayor claridad). El de *CryBaby* no fue analizado ya que difieren unicamente en una etapa de buffer a la entrada (misma respuesta en frecuencia).

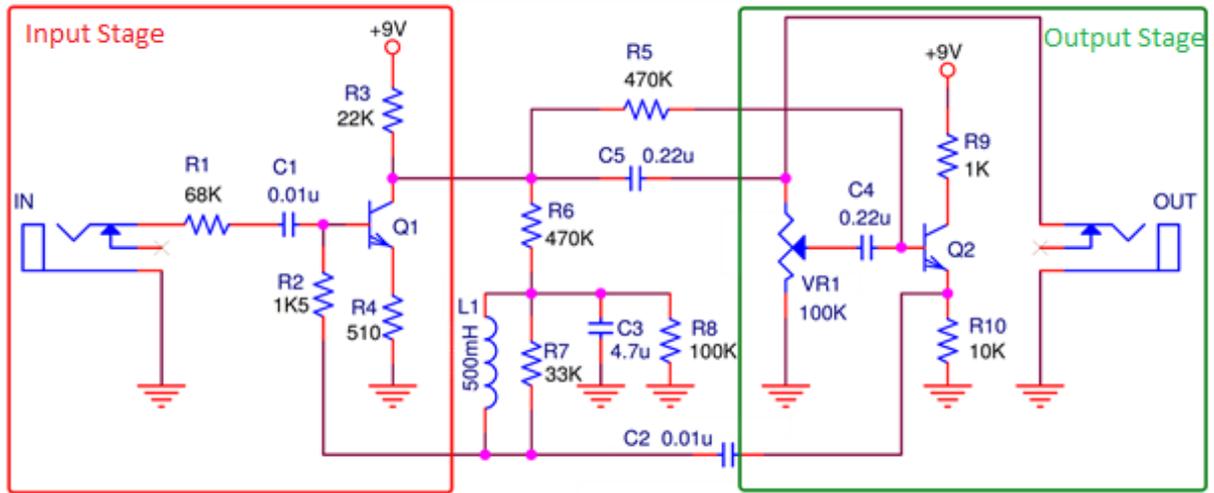


Figura 44: Circuito de Wah Wah en base a BJT. Se denotan las etapas de entrada y salida.

En primer lugar se realizará un análisis en continua del circuito para determinar los puntos de operación de los transistores. Para este análisis los capacitores son considerados como un circuito abierto, el inductor como un cable y cada transistor es reemplazado por su modelo equivalente. La siguiente figura detalla las tensiones de cada nodo comprobadas con simulaciones.

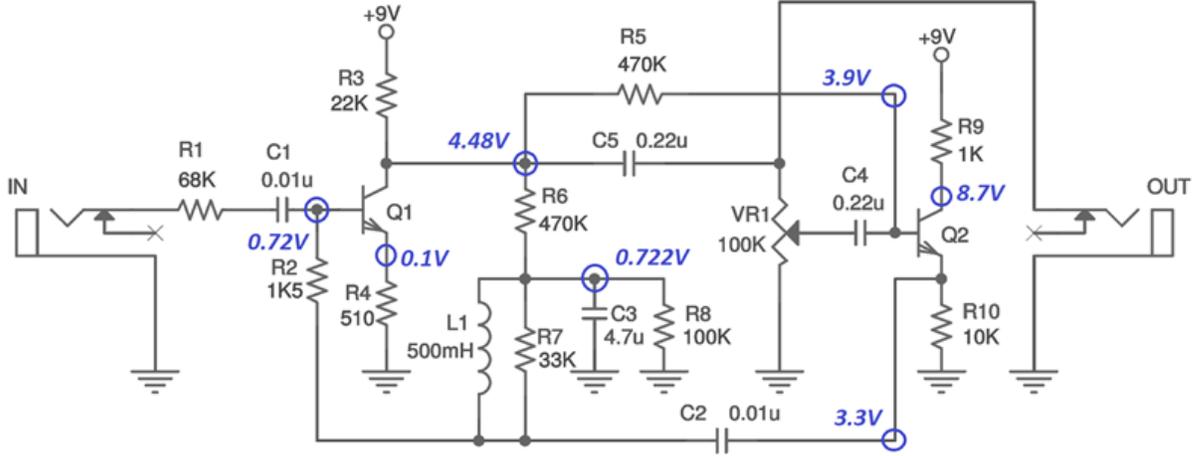


Figura 45: Circuito de Wah Wah en base a BJT.

La etapa de salida consiste de un transistor en configuración colector común, es decir que es un seguidor por emisor. El resistor R_9 reduce la tendencia del circuito a oscilar en alta frecuencia, mientras que el objetivo de R_{10} es el de aumentar la impedancia de entrada, ya que $Z_{in} \approx \beta \cdot R_{10}$. Los capacitores C_4 y C_5 son de desacople, R_5 define la polarización del transistor (su valor elevado es para que no participe en el modelo de pequeña señal) y por último, el potenciómetro VR_1 unicamente regula el nivel de señal alterna que ingresa al seguidor.

En la etapa de entrada se destaca en primer lugar al capacitor C_1 y al resistor R_1 . El capacitor aísla a la guitarra de tensiones DC que la puedan dañar, mientras que el resistor sirve para aumentar la impedancia de entrada del circuito. De esta forma se cumple con lo estipulado en el DFMEA (ver cuadro 5) acerca de preservar la integridad de la guitarra.

La impedancia de entrada al circuito está por el serie de R_1 con: el paralelo entre R_2 y la resistencia vista por la base de Q_1 hacia masa (ecuación 5).

$$Z_{in} = R_1 + (R_2 \parallel R_{in}) \cong 69,5 \text{ k}\Omega \quad (5)$$

Donde $R_{in} = R_{\pi} + (\beta + 1) \cdot R_4 \cong 121 \text{ k}\Omega$ es la resistencia vista desde la base del transistor. Se observa que el paralelo $R_2 \parallel R_{in}$ es despreciable respecto a R_1 y $R_{\pi} = \frac{V_{\pi}}{I_B} \Big|_{v_{ce}=0} \cong 19 \text{ k}\Omega$.

En la siguiente figura se ilustra la impedancia de entrada del circuito en función de la frecuencia. Nótese que el valor de la resistencia R_1 es una asíntota para la curva.

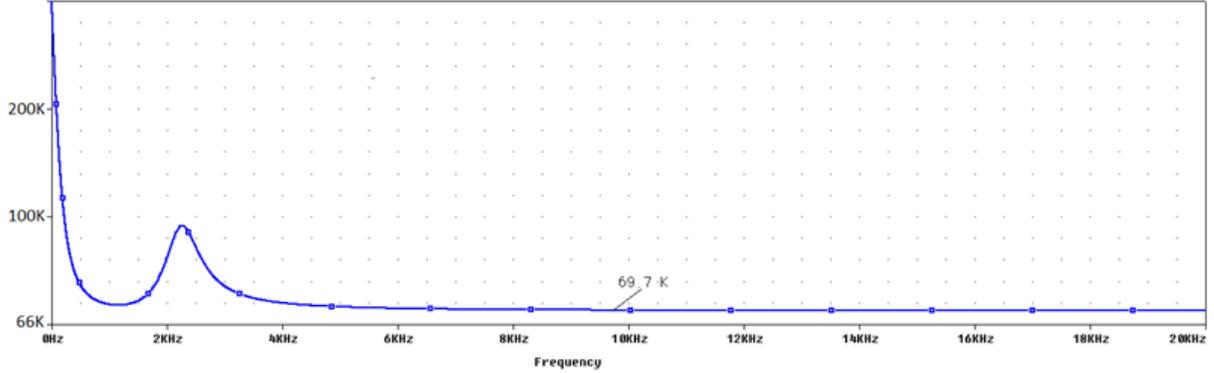


Figura 46: Módulo de la impedancia de entrada del circuito en función de la frecuencia.

Por otra parte, el transistor Q_1 se encuentra conectado en una conexión emisor común, por lo que la ganancia a lazo abierto de la etapa de entrada está dada por el cociente de las resistencias de colector (R_3) y la de emisor efectiva ($R_4 + R_\pi$). Es así que la ganancia de tensión en la etapa de entrada a lazo abierto para β lo suficientemente grande es de:

$$|G_V| = \frac{R_3}{R_4 + \frac{R_\pi}{\beta}} \cong 36 \equiv 31dB \quad (6)$$

Ahora teniendo en cuenta la atenuación debido al divisor resistivo entre R_1 y la resistencia efectiva de emisor, se tiene una atenuación dada por:

$$\frac{R_{in}}{R_1 + R_{in}} \cong \frac{121k\Omega}{121k\Omega + 68k\Omega} = 0,64 \equiv -4dB \quad (7)$$

Por lo tanto en conjunto se tiene una ganancia de 23 o 27 dB.

Para estudiar la respuesta en frecuencia del circuito debe destacarse que el filtro pasivo es un pasa altos de segundo orden determinado por el inductor L_1 , el capacitor C_2 y el resistor R_7 . Este filtro pasa altos cuando se suma a la tensión de entrada en la base del transistor Q_1 se convierte en un filtro pasa bajos si una de las señales está defasada 180° (se demuestra en el anexo). Finalmente el efecto pasa banda se consigue en virtud de los capacitores de desacople, que en conjunto con las impedancias de entrada de los transistores, forman filtros pasa altos cuyos ceros (de la función transferencia) se ubican en frecuencias muy cercanas al 0 Hz . El efecto de sintonización del filtro R-L-C a partir de un inductor y un capacitor fijo se consigue gracias al buffer de tensión que proporciona Q_2 . Esto puede entenderse si se observa que el capacitor C_3 hace que uno de los extremos del inductor L_1 se encuentre conectado a masa para señales alternas dentro del espectro audible. Por otro lado, el emisor de Q_2 es un nodo de baja impedancia (denotado V_a de ahora en más) que suministra corriente a través del capacitor C_2 al nodo central del circuito resonante (identificado como V_b). Si el potenciómetro del Wah Wah aumenta, más corriente circulará por el capacitor ya que el buffer de tensión impide que el circuito resonante cargue al potenciómetro. Lo mismo ocurre si el potenciómetro reduce su resistencia. En ambos casos la corriente que circula por el capacitor hace que el valor efectivo de éste se vea afectado de acuerdo a la posición del potenciómetro.

En la siguiente figura se extraen los componentes para clarificar la explicación y dejar en evidencia los nombres con que se identifican los nodos.

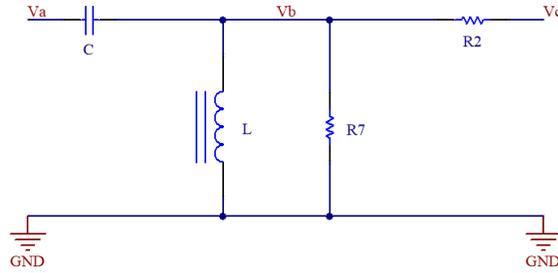


Figura 47: Circuito pasa altos RLC de segundo orden.

Se puede demostrar (ver anexo) que la función transferencia entre los nodos V_b y V_a es:

$$H(s) = \frac{s^2 \cdot LC}{s^2 \cdot LC + s \frac{L}{R_7} + 1} \quad (8)$$

Para comprender el funcionamiento del Wah Wah es necesario visualizar el diagrama en bloques de todo el circuito. En la siguiente figura se reemplazan las etapas de los transistores por amplificadores operacionales (se omiten los capacitores de desacople por simplicidad). Este enfoque sirve para proseguir con el análisis del circuito que será explicado a continuación.

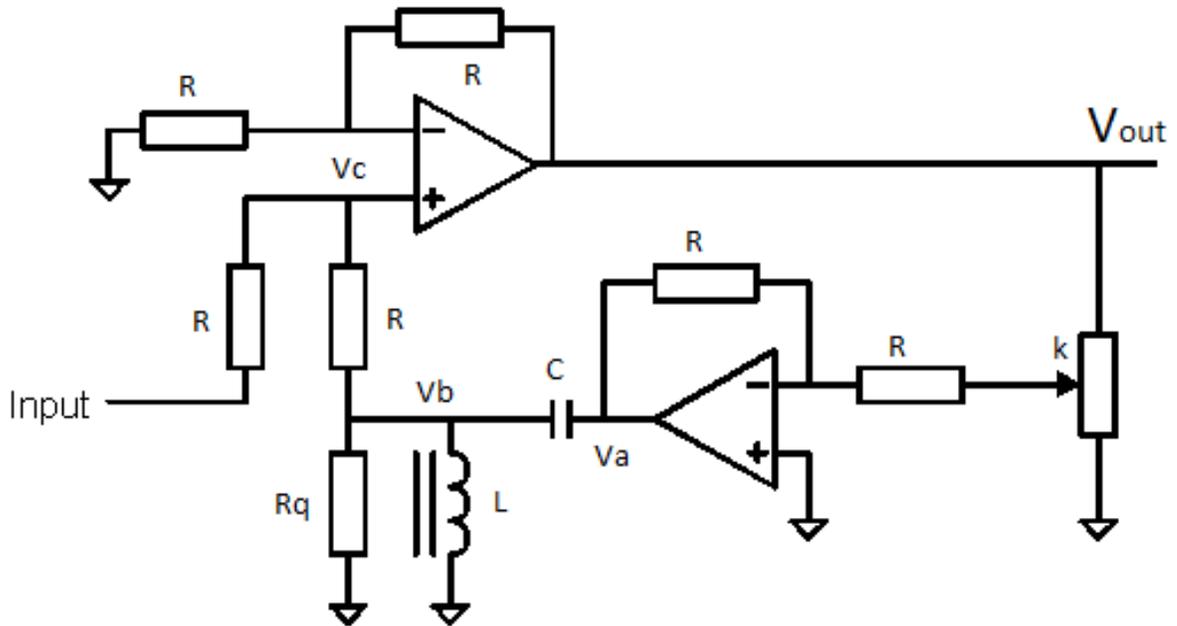


Figura 48: Versión simplificada del esquemático original.

La resistencia de entrada que se observa en el esquemático anterior tiene su correspondencia con la resistencia R_1 del circuito a transistores. En el nodo V_c se observa una resistencia que cumple la misma función que la resistencia R_2 (sumar corrientes en la base de Q_1). Sin embargo en el nuevo circuito esta suma de corrientes ocurre en el amplificador operacional que está conectado en una configuración sumadora no inversora como la de la figura 49, con su ecuación característica detallada tras la misma. Este operacional si bien reemplaza al transistor Q_1 , no invierte. Por lo tanto, al reemplazar al transistor Q_2 se pone una etapa de ganancia de tensión de -1 en vez de $+1$. La etapa del filtro pasa altos no tiene cambios respecto la versión a transistores.

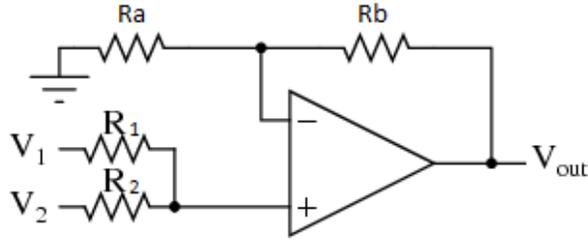


Figura 49: Amplificador operacional conectado en configuración sumadora no inversora.

$$V_{out} = \left(1 + \frac{R_b}{R_a}\right) \cdot \frac{\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} \quad (9)$$

De esta forma se tiene que la tensión de salida del Wah Wah está dada por:

$$V_{out} = 2 \cdot \frac{\frac{V_{in}}{R} + \frac{V_b}{R}}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R}} = V_{in} + V_b \quad (10)$$

Donde V_b es:

$$V_b = -k \cdot V_{out} \cdot H(s) \quad (11)$$

Siendo $H(s)$, la transferencia pasa altos hallada en la ecuación 8. Se puede demostrar (ver anexo) que de la ecuación 8, 10 y 11 se puede llegar a la transferencia del circuito:

$$H(s) = G \cdot \frac{\left(\frac{s}{\omega_z}\right)^2 + \frac{s}{\omega_z Q_z} + 1}{\left(\frac{s}{\omega_p}\right)^2 + \frac{s}{\omega_p Q_p} + 1} \quad (12)$$

Donde las singularidades están definidas por:

$$ceros : \begin{cases} \omega_z = \frac{1}{\sqrt{LC}} \\ Q_z = R_7 \cdot \sqrt{\frac{C}{L}} \end{cases} \quad (13)$$

$$polos : \begin{cases} \omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC(1+k)}} \\ Q_p = R_7 \cdot \sqrt{\frac{C(1+k)}{L}} \end{cases} \quad (14)$$

Y $k \in [0; 1]$ representa la posición del potenciómetro.

Nótese que los ceros son independientes de la posición del potenciómetro, en cambio la posición de los polos depende de este factor, no solo en la frecuencia (distancia desde el polo al origen), sino para el factor de calidad (determinado por el ángulo entre el polo y los ejes).

Las expresiones anteriores se han obtenido para demostrar desde un punto de vista teórico el funcionamiento del circuito, sin embargo como no se han tenido en cuenta los capacitores de desacople ni los modelos físicos de los transistores no se hará uso de las mismas sino que se recurrirán a simulaciones funcionales del circuito frente a distintas posiciones del potenciómetro $0 \leq k \leq 1$ y de esta forma caracterizar la transferencia $H(s)$. Se observa a partir de la siguiente figura que en el rango de frecuencias audibles ($20\text{ Hz} - 20\text{ kHz}$) el circuito se comporta claramente como un pasabanda de orden 2 y que fuera de ese rango entran en juego las singularidades atribuidas a los capacitores de desacople.

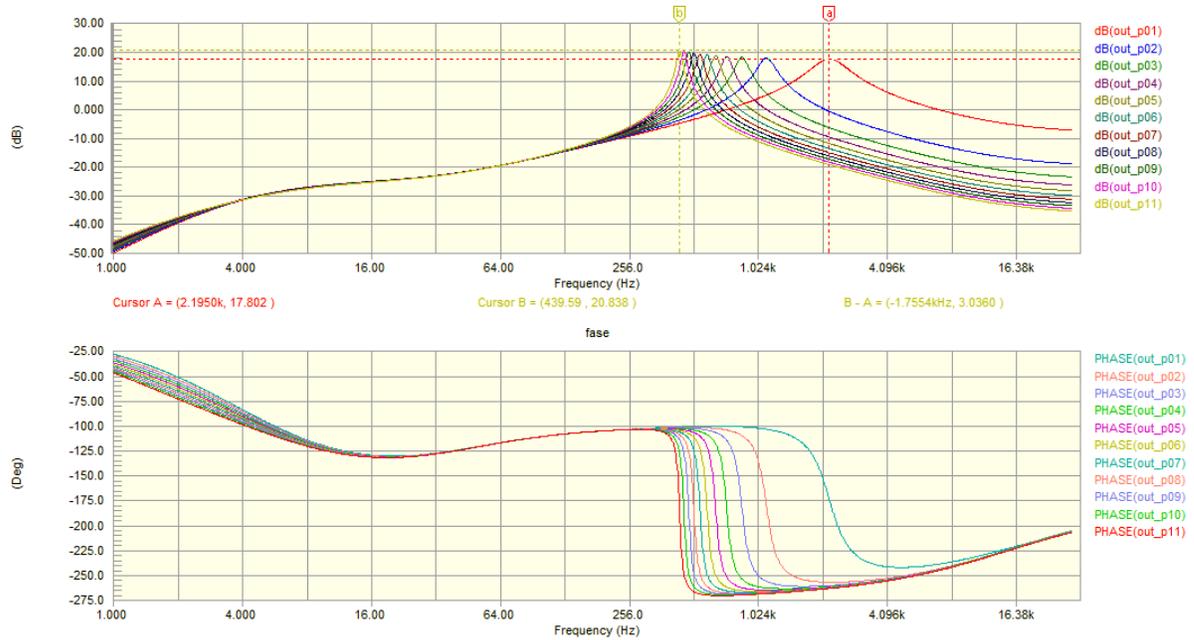


Figura 50: Respuesta en frecuencia del filtro pasabanda en función del parámetro k (posición del potenciómetro) en todo el rango de frecuencias de interés.

La función transferencial que tiene el filtro es de la forma pasabanda, y su modelo más simple que se ajusta bastante bien en la banda de paso es uno de orden 2 como el siguiente:

$$H(s) = G \cdot \frac{\frac{\omega_0}{Q}s}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2} \quad (15)$$

Se simuló para distintos valores de k los siguientes parámetros característicos de la respuesta en frecuencia:

k	f_0 [Hz]	Q [veces]	G [veces]
0.0	2195	2.9	7.8
0.1	1120	5.8	8.0
0.5	590	12.1	9.0
0.9	460	18.2	10.5
1.0	439	20.0	11.0

Cuadro 11: Parámetros característicos de la función transferencial del filtro con transistores e inductor ante distintas posiciones del potenciómetro.

Por otra parte, si bien para el análisis anterior se asumió un modelo completamente lineal y se utilizó la aproximación de pequeña señal para linealizar los transistores. Se encontró que el inductor además de ser uno de los principales responsables de la resonancia del circuito y de permitir conseguir altos factores de calidad, también participa en la polarización de los transistores[8]. Su valor es de $0,5H$ y tiene un núcleo toroidal de hierro, y la circulación de corriente continua a través del mismo genera una magnetización permanente en el núcleo y esto hace que el mismo sature de forma asimétrica para señales alternas (ver zona no lineal de la figura 51). Este efecto difícilmente replicable con un circuito lineal puede ser un factor determinante para optar por el circuito a transistores, y de hecho fue la razón del fracaso comercial de los circuitos en base a amplificadores operacionales.

La saturación simétrica de señales alternas tiene la ventaja de que al poseer simetría de media onda, los armónicos pares no se encuentran presentes en el espectro. Sin embargo, ante una saturación asimétrica

de una señal sinusoidal todos los armónicos se hacen presentes en el espectro ya que el desarrollo en serie de Fourier de la señal saturada asimetricamente no goza de ningún tipo de simetría que simplifique la composición armónica.

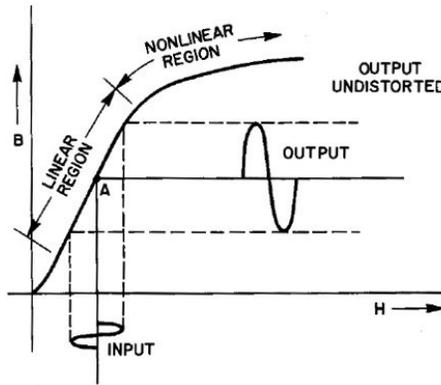


Figura 51: Señal de salida cuando se trabaja en la zona lineal.

El circuito que finalmente se utilizará para el Wah Wah es el de *Cry-Baby*, el cuál está caracterizado por la función transferencia de la ecuación 12.

2. *Filtro con amplificador operacional y sin inductor (Doble T)*: Este circuito consiste simplemente en una celda de segundo orden para realizar el filtrado pasabanda propuesto, es un filtro pasabanda formado por una red de feedback tipo Notch-Doble T¹². La ventaja de este circuito es que existen variantes a su topología básica (que emplea sólo 7 componentes y se ilustró en la sección de Factibilidad Tecnológica) para conseguir Notch Depth¹³, Q y estandarización de los componentes a valores comerciales. Se ha investigado sobre estas variantes[5, 6] y se ha confeccionado el esquemático presentado en la siguiente figura, que posee todos componentes de valor comercial y se adecua a los parámetros del filtro pasa banda original. La gran desventaja de este circuito es que para poder desplazar la frecuencia central del pasabanda se deben cambiar los valores de 3 resistencias en simultáneo y por esta razón se lo terminó descartando.

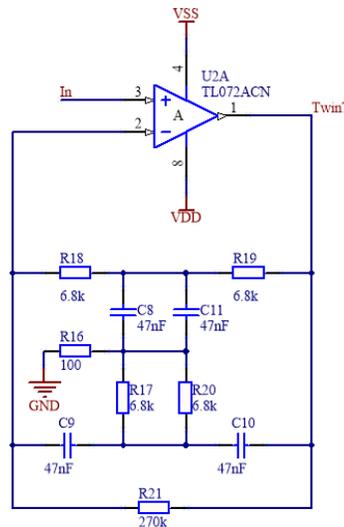


Figura 52: Filtro con amplificador operacional y sin inductor (Doble T)

¹²Las redes Notch-Doble T son las únicas topologías de componentes pasivos que permiten conseguir ceros de transmisión.

¹³Notch Depth: Se define de esta forma a la atenuación real medida del filtro a la frecuencia del cero complejo, es decir, la máxima atenuación alcanzada a una frecuencia particular.

3. *Filtro con amplificador operacional y sin inductor (Celda Rauch o Deliyannis friend modificada):*
 El circuito que responde a esta topología se presentó en la figura 21. La ventaja de este circuito es que se pueden alcanzar altos valores de Q respecto a otras celdas. El problema es que para interpolar las funciones transferencia del BJT hay que variar las 3 resistencias. Ahora bien, si se varía solo R_3 se puede conseguir un matcheo perfecto en baja frecuencia y en alta frecuencia un Q similar aunque con una diferencia de casi 30 dB (se tienen -10 dB cuando se deberían tener aprox 20 dB). Esto se podría compensar con una etapa de ganancia, aunque la pérdida de rango dinámico hace inviable esta alternativa.

En la siguiente imagen se ilustra lo que pasa con la celda Rauch cuando se varía R_3 desde los $42,1\text{ kHz}$ en baja frecuencia hasta los $1,44\text{ MHz}$ en alta frecuencia. La curva de la derecha abajo es la que resulta, la de la derecha arriba es la que debería ser. El pasabanda de la izquierda es el del BJT superpuesto perfectamente con el de la Rauch en la zona de interes (donde vale el modelo lineal).

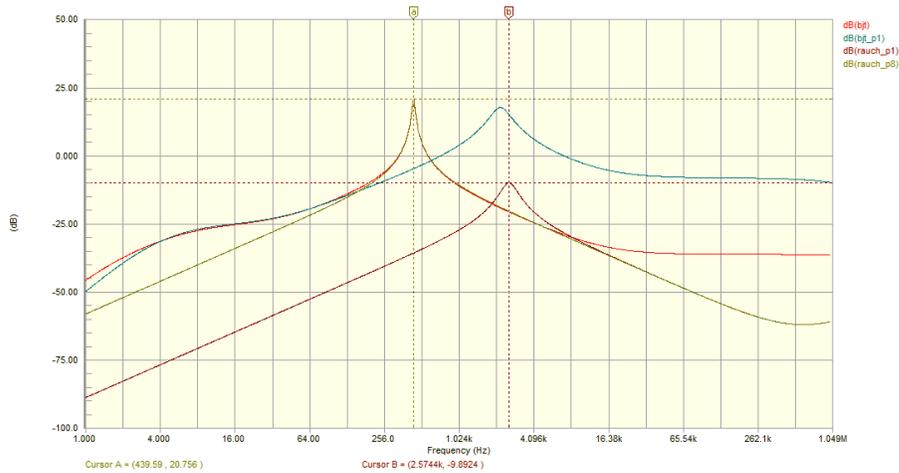


Figura 53: Extremos de la función transferencias. Nótese la pérdida de rango dinámico si se añade una etapa de ganancia.

Módulo de adquisición El módulo de adquisición cuenta de un módulo inercial que consta de un acelerómetro y un giróscopo, ambos de tres ejes. Se utilizó la combinación acelerómetro-giróscopo ya que utilizando el giróscopo se compensa la aceleración que se le da al acelerómetro al moverlo de forma tal de obtener la dirección del vector de gravedad. El integrado utilizado es el LSM6DS3.

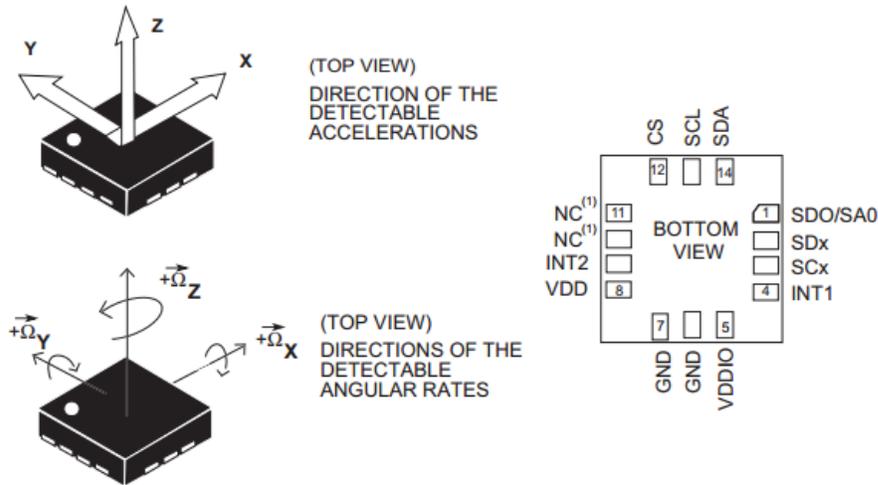


Figura 54: LSM6DS3

Módulo de control (receptor) El módulo de control del receptor se encarga de enviar al potenciómetro digital (mediante protocolo SPI) el valor del punto medio en función del dato recibido por el módulo de comunicaciones. Nótese que no hay potenciómetros digitales logarítmicos disponibles en el mercado y ya que la variación del punto medio del potenciómetro en función de una variación angular lineal debe ser logarítmica, el módulo de control se encarga de realizar dicha función. Esto se encuentra detallado en la sección de software. El módulo de control también se encarga de seleccionar si el pedal se encuentra activo o no. El funcionamiento interno de este módulo y todos los comandos que maneja se encuentran detallados en la documentación de software.

Módulo de control (transmisor) El módulo de control del transmisor se encarga de tomar los datos del módulo de adquisición y procesarlos para obtener la inclinación del transmisor. Ya que el acelerómetro mide la fuerza aplicada al transmisor, es un buen estimador de la dirección del vector gravedad sólo cuando el dispositivo se encuentra a velocidad constante, ya que si el dispositivo está acelerando se le está imprimiendo una fuerza de acuerdo a la Segunda Ley de Newton. Para mitigar este efecto, se utiliza el dato del giroscopio para obtener el vector gravedad de acuerdo a la siguiente ecuación.

$$\hat{\theta}(t) = Acc(t) - \alpha \cdot \frac{dGyr(t)}{dt} \quad (16)$$

En donde $Acc(t)$ y $Gyr(t)$ son los datos del acelerómetro y del giroscopio respectivamente en un cierto instante de tiempo, $\hat{\theta}(t)$ el ángulo estimado y α una constante que depende del momento de inercia del transmisor.

7.2.3. Plan de prueba de cada módulo

Módulo de alimentación En el caso del transmisor, el módulo de alimentación sólo consta de la pila de litio de 3V. Para el módulo receptor, en primer lugar se medirán las tensiones de 9V y a la salida del regulador. Si ambas son correctas se procede a medir la aislación de las alimentaciones digital y analógica. Para eso se cortocircuita la entrada de la señal analógica y se mide la señal a la salida del filtro. Se espera que de haber una señal pulsada cuando llega un paquete, esta se encuentre por debajo del piso de ruido inherente al filtro analógico. En caso contrario, se procede a verificar el filtro CLC encargado del aislamiento de las alimentaciones.

Módulo de comunicación En este caso se utilizó un módulo comercial, lo que asegura que el módulo funcione correctamente. En etapa de producción se propone probar que un par de módulos por lote (uno del transmisor con uno del receptor) se puedan comunicar correctamente.

Módulo de filtrado Para el módulo de filtrado se propone medir la respuesta en frecuencia del mismo para cada una de las 255 posibles posiciones del potenciómetro. Este proceso es automatizable realizando recorrido por todas las posiciones del potenciómetro digital.

Módulo de control (receptor) Para probar el control del potenciómetro digital realizado por este módulo se envía por UART al microcontrolador todos los valores posibles del potenciómetro y se mide el valor que tomó el potenciómetro digital para cada valor de entrada.

Para probar que si se recibe un comando que modifique un parámetro interno, se corre al programa en modo debugger y se prueban todos los casos posibles.

Módulo de control (transmisor) Para probar el módulo de control del transmisor, se procede a variar la posición angular del transmisor de -45° a 45° . Se consierará al módulo calibrado cuando la salida no presente sobrepicos en el momento de frenado.

7.3. Software

En esta sección se presenta el detalle del software necesario tanto en el transmisor como en el receptor.

7.3.1. Diagramas de estados y flujograma

RECEPTOR

El programa del microcontrolador (firmware) consiste básicamente en la recepción de datos por medio de una comunicación Bluetooth, el procesado de los datos recibidos, la modificación del valor del potenciómetro digital por medio del módulo SPI y una interfaz con el usuario conformada por el control de LEDs y un pulsador. En la siguiente figura se puede apreciar todo esto en el diagrama en bloques general del firmware.

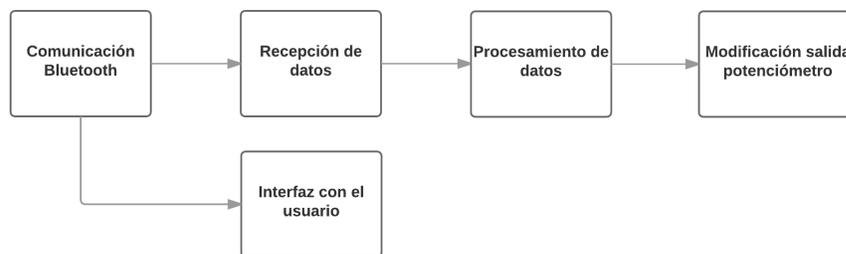


Figura 55: Diagrama en bloques del firmware del receptor

El software de aplicación que se encarga de transmitir los datos por medio de Bluetooth si bien es el encargado de comandar al módulo que contiene el potenciómetro digital, se lo puede considerar un objeto adicional dado que varía según las preferencias del usuario. Existen numerosas alternativas para variar el valor del potenciómetro digital, las cuales pueden implementarse mediante sensores de aceleración, sensor giroscopio, sensores de luminosidad, utilizando un barra deslizadora, entre otros. Para el caso de este proyecto, se decidió optar por la variante del sensor de aceleración ya que el mercado prefería la posibilidad de variar el efecto de forma inalámbrica y con distintas partes del cuerpo.

Comunicación Bluetooth: La comunicación Bluetooth se encuentra dividida en dos partes o submódulos interconectados, una para el control del módulo Bluetooth y la otra para la transmisión y recepción de datos.

En el caso del bloque de control del módulo se encuentran las subrutinas para setear el nombre con el cual será visto por los dispositivos que quieran aparearse al mismo, la clave o ping del módulo y la velocidad de transmisión de datos (baudrate). Este bloque o submódulo se encarga adicionalmente de indicarle al bloque de interfaz con el usuario si el módulo Bluetooth está conectado o si se encuentra buscando dispositivos para conectarse. La interfaz de usuario utiliza un LED para indicar ambas posibilidades, el LED encendido para la primera opción y un intermitente periódico o blinking cada 500ms para la segunda.

El código en C que realiza esta funcionalidad es el siguiente:

```
typedef enum {
    BT_BR_1200 = 1,
    BT_BR_2400,
    BT_BR_4800,
    BT_BR_9600,
    BT_BR_19200,
    BT_BR_38400,
    BT_BR_57600,
    BT_BR_115200,
    BT_BR_230400
} BT_BAUDRATE;

void Bt_Init(void);
void Bt_SetName(char *str);
void Bt_SetPing(char *str);
void Bt_SetBaudRate(BT_BAUDRATE baudrate);
```

El submódulo de transmisión y recepción de datos consiste básicamente en el control del módulo UART del microcontrolador. El mismo ofrece la subrutina para la recepción de datos y adicionalmente también incluye distintas subrutinas para el envío de datos. En los dos casos se utiliza un buffer FIFO (First In, First Out) para evitar la pérdida de datos.

```
void Uart_Init(void);

void Uart_SendByte(uint8_t data);
void Uart_SendBlock(uint8_t *data, uint8_t size);
void Uart_SendString(char *data);
uint8_t Uart_GetBlock(uint8_t *data);

void Uart_Isr(void);
```

Potenciómetro digital: Este módulo se encarga básicamente de comandar el potenciómetro digital utilizando el módulo SPI del microcontrolador. Los potenciómetros digitales que se encuentran en el mercado poseen una variación lineal de la resistencia, pero la etapa de audio requiere una variación logarítmica de la resistencia, por lo que se optó por realizar la corrección de este problema por software en el microcontrolador. La forma más rápida de implementar esto es por medio de una tabla, en la cual se ingresa con el valor lineal para realizar la transformación a logarítmico. De esta forma se economiza tiempo de cálculo a expensas de uso de memoria, lo cual para este proyecto abunda.

Se adjunta la definición de la tabla empleada.

```

const byte convTable[N_POINTS] = { 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1,
1, 1, 1, 1, 1, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 3, 3,
3, 3, 3, 3, 3, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 5, 5, 5, 5,
5, 5, 6, 6, 6, 6, 6, 6, 7, 7, 7, 7, 7, 7, 8, 8, 8,
8, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 10, 10, 10, 10, 10, 11, 11, 11, 11, 12,
12, 12, 13, 13, 13, 13, 14, 14, 14, 15, 15, 15, 16, 16, 16,
17, 17, 17, 18, 18, 18, 19, 19, 19, 20, 20, 21, 21, 21, 22,
22, 23, 23, 23, 24, 24, 25, 25, 26, 26, 27, 27, 28, 28, 29,
29, 30, 30, 31, 31, 32, 32, 33, 33, 34, 34, 35, 36, 36, 37,
37, 38, 39, 39, 40, 41, 41, 42, 43, 43, 44, 45, 46, 46, 47,
48, 49, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60,
61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75,
77, 78, 79, 80, 81, 83, 84, 85, 86, 88, 89, 90, 92, 93, 95,
96, 98, 99, 100, 102, 104, 105, 107, 108, 110, 112, 113, 115, 117, 118,
120, 122, 124, 125, 127, 129, 131, 133, 135, 137, 139, 141, 143, 145, 147,
150, 152, 154, 156, 159, 161, 163, 166, 168, 170, 173, 175, 178, 181, 183,
186, 189, 191, 194, 197, 200, 203, 206, 209, 212, 215, 218, 221, 224, 227,
231, 234, 237, 241, 244, 248, 251, 255 };

```

Las subrutinas utilizadas para el control del potenciómetro digital se pueden observar a continuación. Se incluyen las subrutinas de control del potenciómetro digital y SPI utilizando interrupciones.

```

void DigPot_Init(void);
void DigPot_SetValue(byte value);
void DigPot_ClearFlag(void);

LDD_TDeviceData* SPI_Init(LDD_TUserData *UserDataPtr);
LDD_TError SPI_SendBlock(LDD_TDeviceData *DeviceDataPtr, ...
                        LDD_TData *BufferPtr, uint16_t Size);
PE_ISR(SPI_Interrupt);

```

Interfaz con el usuario: En este módulo se encuentra el control de los LEDs de la placa, uno para el módulo Bluetooth y otro para indicar que el microcontrolador se encuentra encendido o fuera del modo de bajo consumo. Para salir del modo bajo consumo se utiliza el pulsador de la placa. Es necesario que el microcontrolador se encuentre en bajo consumo, ya que cuando el módulo Bluetooth se encuentra buscando dispositivos, éste posee consumos de corriente alrededor de 20 mA.

TRANSMISOR

El firmware del transmisor es el encargado de adquirir las señales del acelerómetro+giroscopo, procesarlas y comunicarse con el módulo bluetooth para enviar la información al receptor. A continuación se puede observar el diagrama en bloques de dicho firmware.

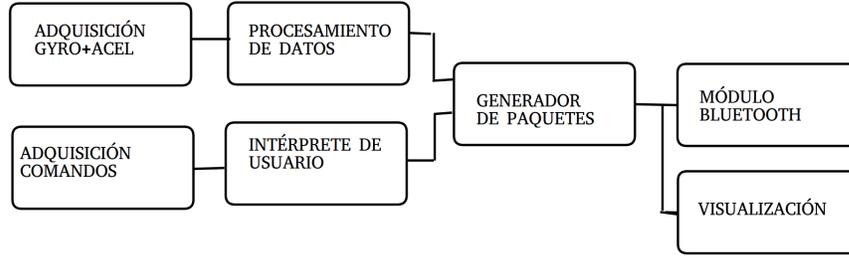


Figura 56: Diagrama en bloques del firmware del transmisor

Adquisición de datos El módulo de adquisición es el encargado de adquirir los datos del circuito integrado LSM6DS3. La comunicación con el integrado se hace por medio de protocolo SPI y se adquieren datos 1200 veces por segundo.

Procesamiento de datos Es el módulo encargado de implementar en tiempo discreto la ecuación 16. El algoritmo realiza la siguiente operación.

$$\hat{\theta}_N = Acc_N - \beta \cdot (Gyr_N - Gyr_{N-1}) \quad (17)$$

Donde la constante β no sólo depende del tiempo de inercia sino de la frecuencia de muestreo.

Adquisición de comandos Este módulo se encarga de medir cuando se presiona el botón de control del transmisor y por cuanto tiempo. Para eso utiliza una entrada de input capture.

Intérprete de comandos El intérprete de comandos recibe datos del módulo de adquisición de comandos y los transforma en códigos correspondientes a comandos para realizar o para enviar al módulo receptor.

Acción del usuario	Comando
Presionar el botón por menos de un segundo	Toggle del efecto
Presionar el botón entre un segundo y dos segundos	Establecer vínculo bluetooth con el receptor
Presionar por más de 2 segundos	Encender o apagar el transmisor

Cuadro 12: Comandos

Generador de paquetes El generador de paquetes es el módulo encargado de juntar la información de datos y de control para ser enviada vía bluetooth. Si no se recibió un nuevo comando se envía el nuevo valor del ángulo medido (entre 1 y 255).

Si se recibió un comando nuevo, se genera primero un byte con el valor 0 y luego un byte indicando el comando.

Código	Comando
0x01	Toggle del efecto
0x02	Establecer vínculo bluetooth con el receptor
0x03	Encender o apagar el transmisor

Cuadro 13: Códigos

Módulo bluetooth Es el módulo encargado de enviarle por protocolo UART los datos al módulo de hardware de bluetooth. La comunicación Bluetooth se encuentra dividida en dos partes o submódulos interconectados, una para el control del módulo Bluetooth y la otra para la transmisión y recepción de datos como se comentó en el módulo receptor.

Módulo de visualización Es el encargado de manejar el color de un led RGB para indicarle al usuario el estado del efecto.

Estado	R	G	B
Receptor no conectado	1	0	0
Pedal en ON	0	1	0
Pedal en OFF	0	0	1

Cuadro 14: Códigos RGB

7.3.2. Plan de prueba de módulos y de depuración de software

Se probó cada módulo por separado. Para el módulo de adquisición la principal prueba es lograr ver los pulsos en el pin de interrupción a la frecuencia deseada, dando cuenta de que el integrado quedó correctamente configurado vía SPI. El módulo de procesamiento de datos funciona correctamente cuando la constante queda ajustada de forma tal que la respuesta al escalón de ángulo no presente sobrepicos. El módulo generador de paquetes y de adquisición e intérprete de comandos son probados de forma separada y se evalúa el funcionamiento completo.

Los dos módulos bluetooth se prueban en conjunto de forma tal que se logre establecer la comunicación a la tasa requerida. Para el control del potenciómetro se evalúa recorriendo todos los posibles valores y midiendo el punto medio del potenciómetro.

8. Construcción del prototipo

8.1. Definición de los módulos

Todos los componentes (Resistencias, capacitores e integrados) fueron elegidos through hole para robustecer el producto.

8.2. Diseño de los circuitos impresos

Primer circuito impreso El primer circuito impreso que se construyó fue el del circuito con transistores e inductor basado en el diseño realizado por Vox. Se separó la parte analógica y la parte digital en dos placas diferentes para poder ser probadas individualmente. El esquemático de la parte analógica se presentó en la figura 16. A continuación se ilustra el diseño simple layer del PCB.

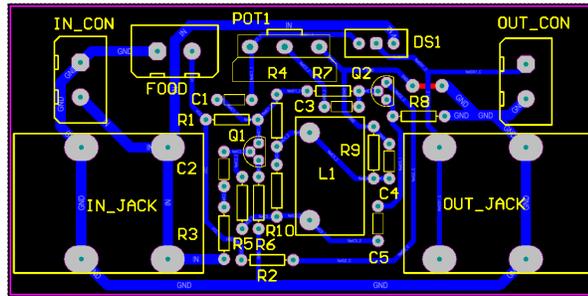


Figura 57: Circuito impreso del Wah Wah de la figura 16.

El esquemático del receptor bluetooth con el potenciómetro digital se ilustra a continuación.

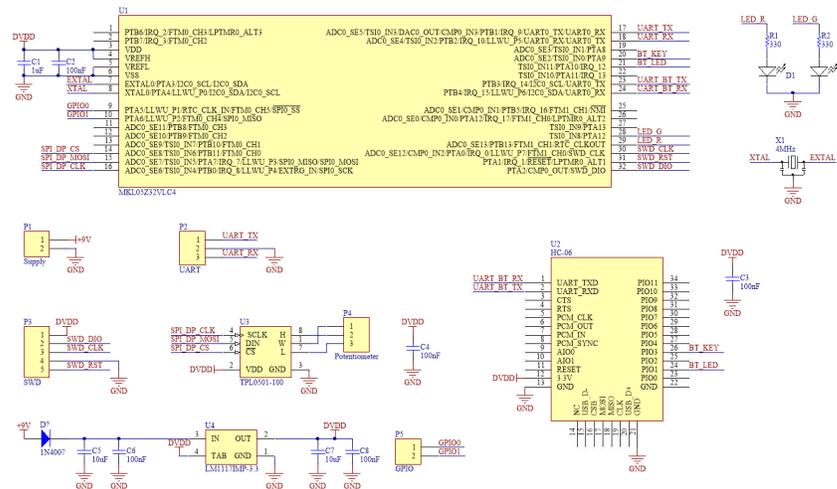


Figura 58: DigiWah Esquemático

El correspondiente PCB se puede observar a continuación.

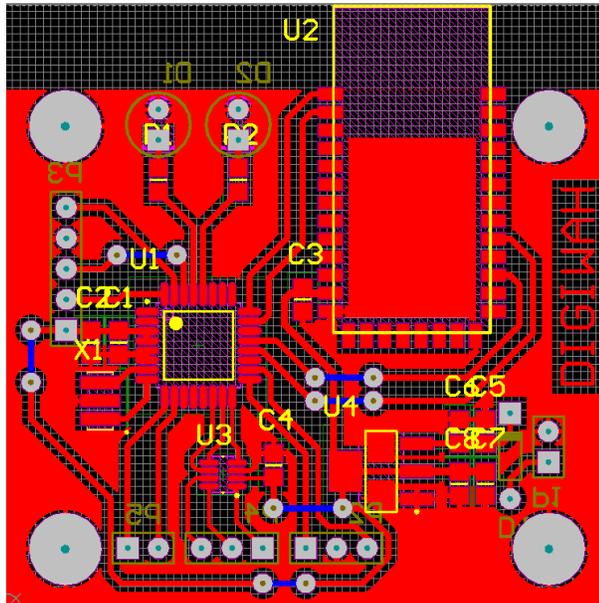


Figura 59: DigiWah PCB

Este primer prototipo se realizó únicamente para probar el funcionamiento del circuito tanto con un potenciómetro convencional como con uno digital y comparar el sonido. La posición del potenciómetro digital fue modificada a través de una aplicación en Android que medía la inclinación del celular y transmitía por bluetooth a un módulo receptor.

Si bien el sonido era el mismo para las dos implementaciones, el principal problema del circuito utilizando el potenciómetro digital y Bluetooth fue el acoplamiento de las masas digital y analógica. A pesar de que se utilizaron capacitores de desacople, la corriente consumida por el módulo Bluetooth a 8kHz se inducía en la masa analógica lo que generaba un tono a la salida de dicha frecuencia. Para este primer prototipo se tuvieron que utilizar alimentaciones diferentes para la parte analógica y para la parte digital. Esto representó el primer problema que no fue tenido en cuenta al momento del diseño ya que se creía que con capacitores de desacople se podría evitar este efecto. Las modificaciones realizadas a la alimentación del circuito para eliminar los efectos audibles del fenómeno descrito se detallan en la descripción de la versión final del módulo receptor.

Modificación del circuito de filtrado

Una vez determinado que el reemplazo del potenciómetro convencional por un potenciómetro digital en el circuito clásico era factible y al no haberse registrado diferencias en el filtrado de la señal respecto a un pedal comercial, se analizaron distintos métodos para realizar el filtrado analógico.

Se implementaron en este caso los circuitos de Morley, Cry-Baby, y una alternativa con amplificadores operacionales. La ventaja de tener separada la parte digital de la analógica era la posibilidad de realizar pruebas a ciegas. Estas pruebas fueron realizadas por músicos y sonidistas profesionales contactados por el grupo¹⁴.

Se determinó que el diseño que se iba a utilizar era una modificación del circuito del Cry-Baby de Jim Dunlop, que fue elegido por el 87,5% de los músicos a partir de las pruebas a ciegas.

Prototipo Final

El prototipo final consta de un módulo de transmisión (que tiene un acelerómetro y giróscopo para determinar su orientación y un transmisor bluetooth) y de un módulo de recepción (que consta de un

¹⁴Los músicos contactados por el grupo son: Danel Gargiulo, Tomás Pinkus, Santiago Stolfi, Tiago Santamaria, Alan Marrapodi, Macarena Salazar, Santiago Outes y Rolando Curten

receptor bluetooth que controla al potenciómetro digital que forma parte del filtro basado en el Cry-Baby).

Módulo Transmisor El esquemático del módulo transmisor se puede observar a continuación.

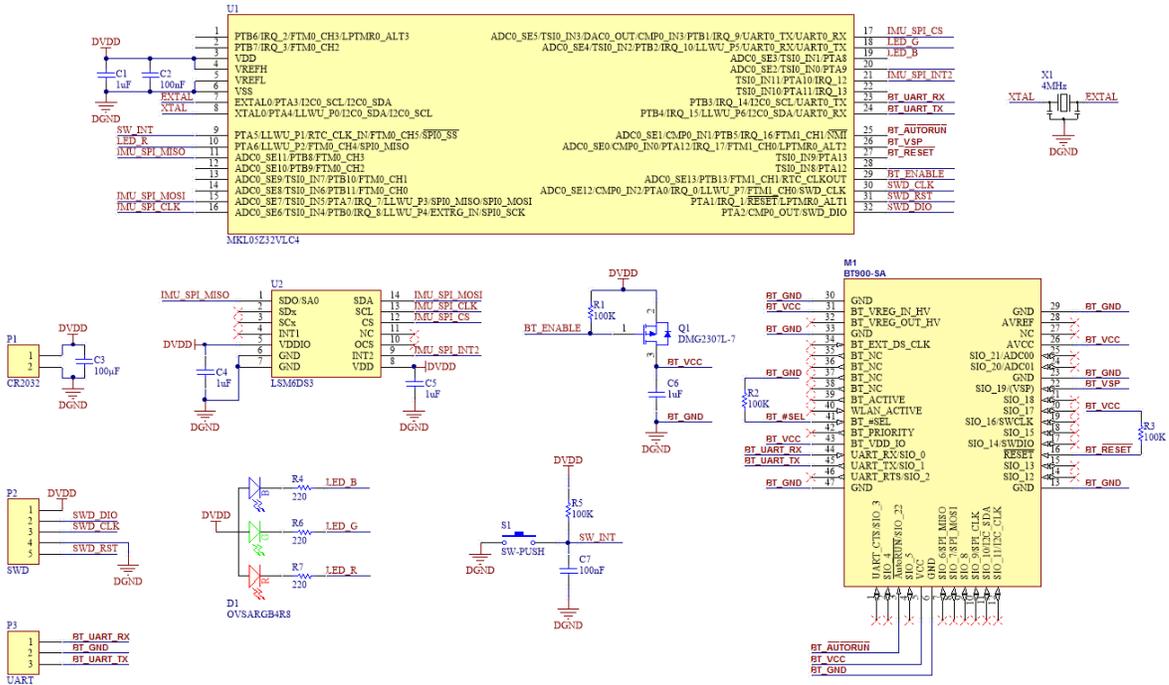


Figura 60: Módulo Transmisor (Esquemático) - Prototipo Final

El PCB del módulo transmisor se puede observar a continuación.

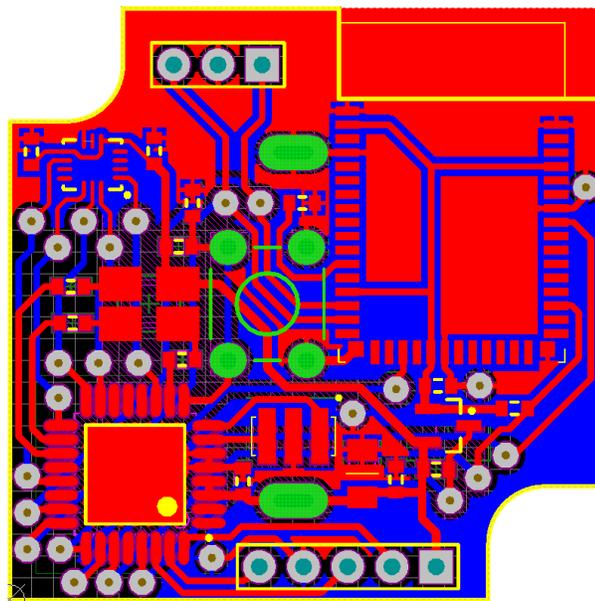


Figura 61: Módulo Transmisor (PCB) - Prototipo Final

Módulo Receptor El esquemático del módulo receptor se puede observar a continuación.

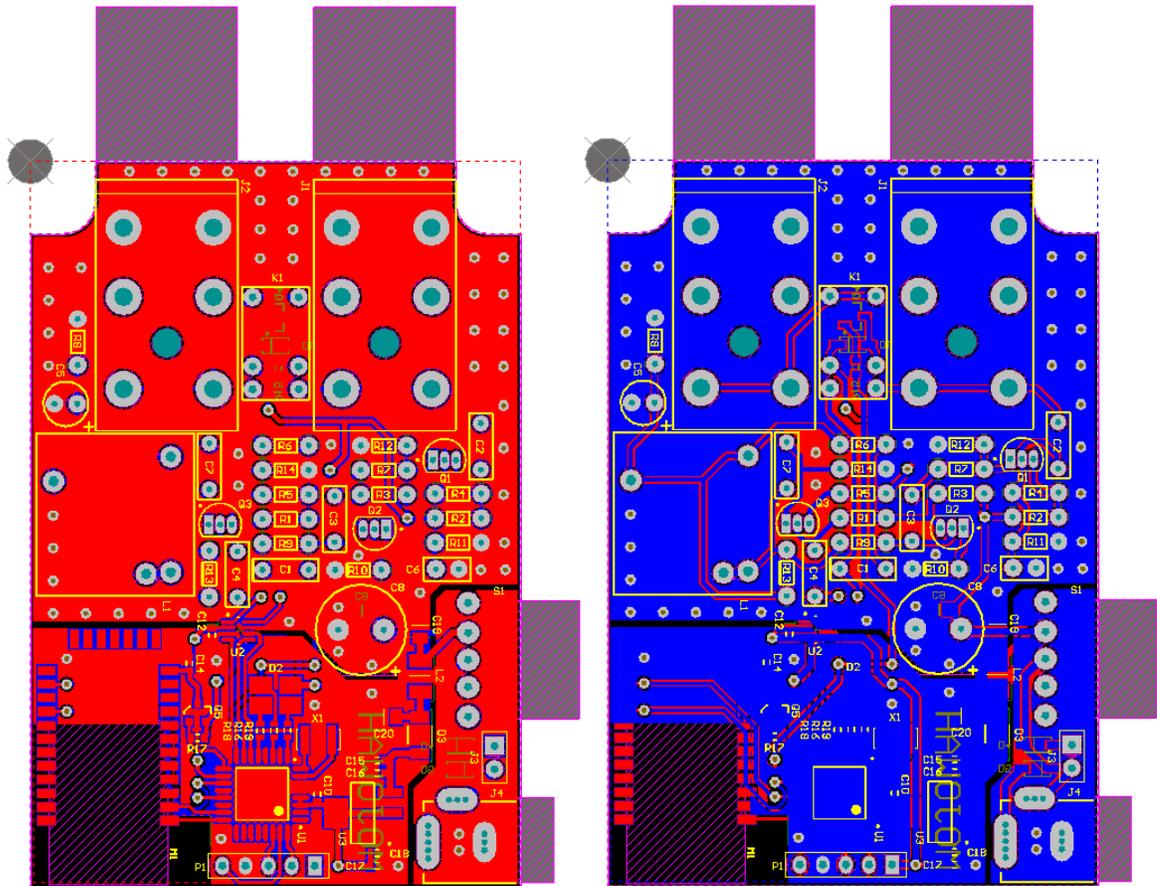


Figura 65: Módulo Receptor (PCB) - Prototipo Final

8.3. Diseño mecánico

Módulo Transmisor

Para el diseño mecánico del módulo transmisor, se buscó utilizar un gabinete capaz de ser aferrado tanto al calzado del usuario como al clavijero de su guitarra. El gabinete además debía ser de un tamaño reducido para garantizar la comodidad del usuario.

Se utilizó entonces el gabinete 1551PFL que además de sus dimensiones reducidas (33.73mm x 33.73mm x 20mm), contaba de dos agujeros que permitían pasar una cinta que se pueda aferrar (ya sea con abrojos o abrochada) al calzado o la guitarra del usuario.

El plano del gabinete 1551PFL se puede observar en la siguiente figura.

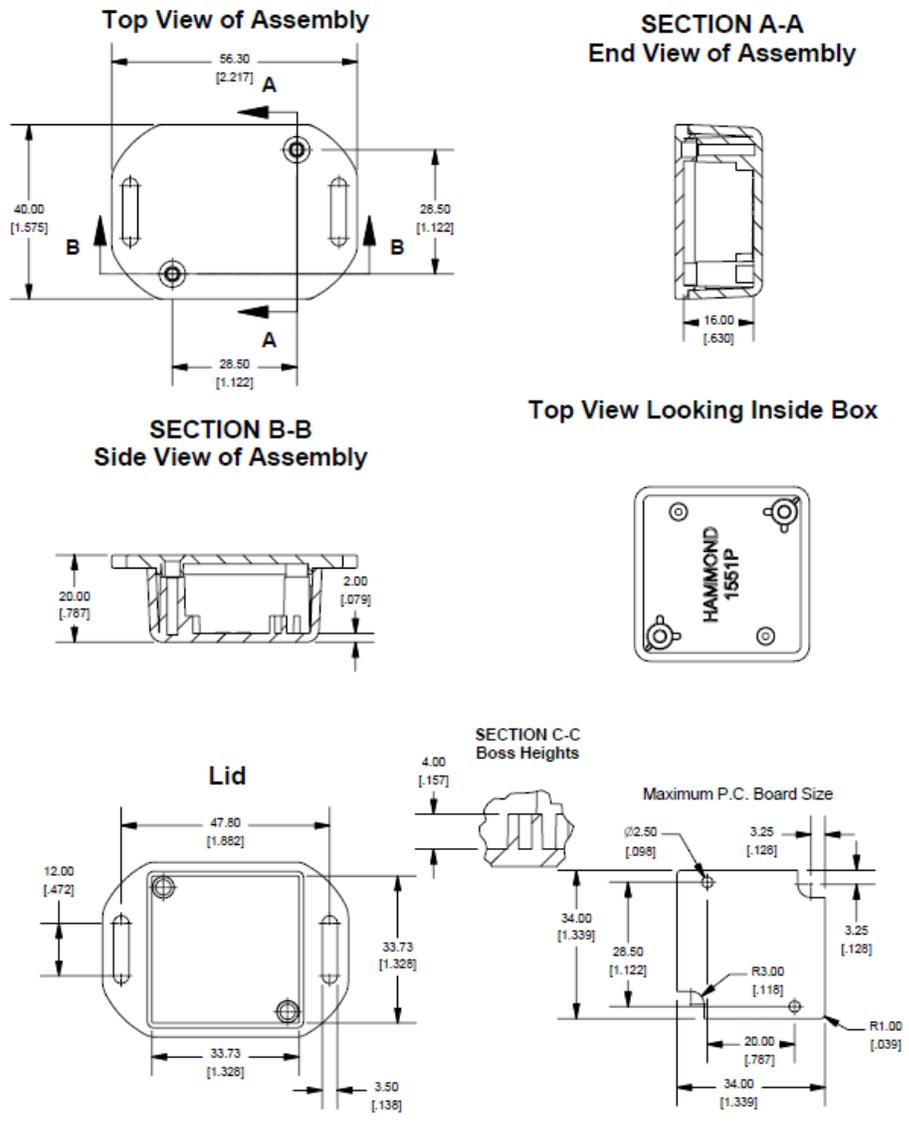


Figura 66: Gabinete Módulo Transmisor

La placa del módulo transmisor se diseñó en base a las especificaciones de tamaño del gabinete.

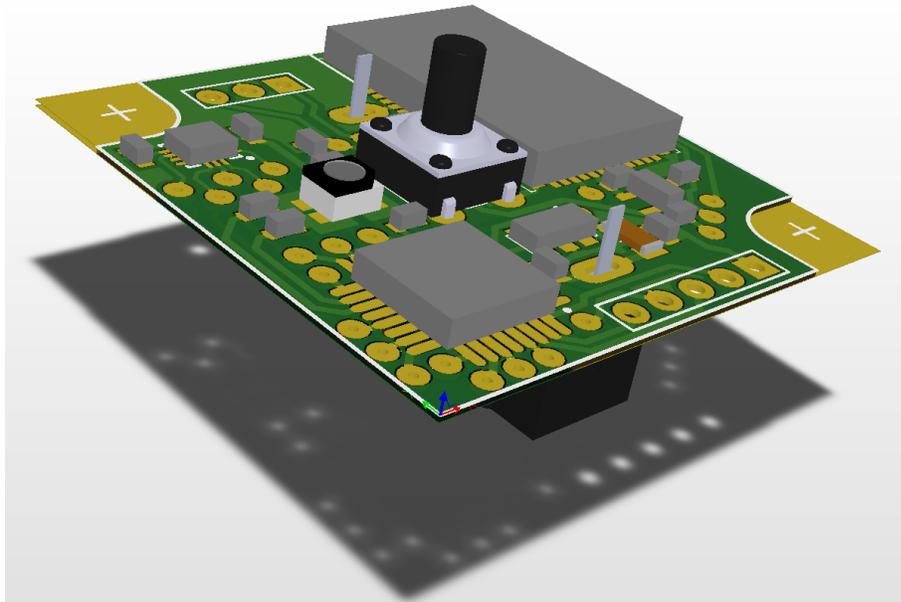


Figura 67: Placa Módulo Transmisor (Top)

Módulo receptor

Para el diseño del módulo receptor las restricciones en el tamaño no eran tan importantes como en el módulo transmisor. Este módulo se encontrará en la cadena de pedales del guitarrista. Se utilizó el gabinete 1591B que tiene dimensiones similares a la mayoría de pedales de guitarra convencionales. Su plano se puede ver a continuación.

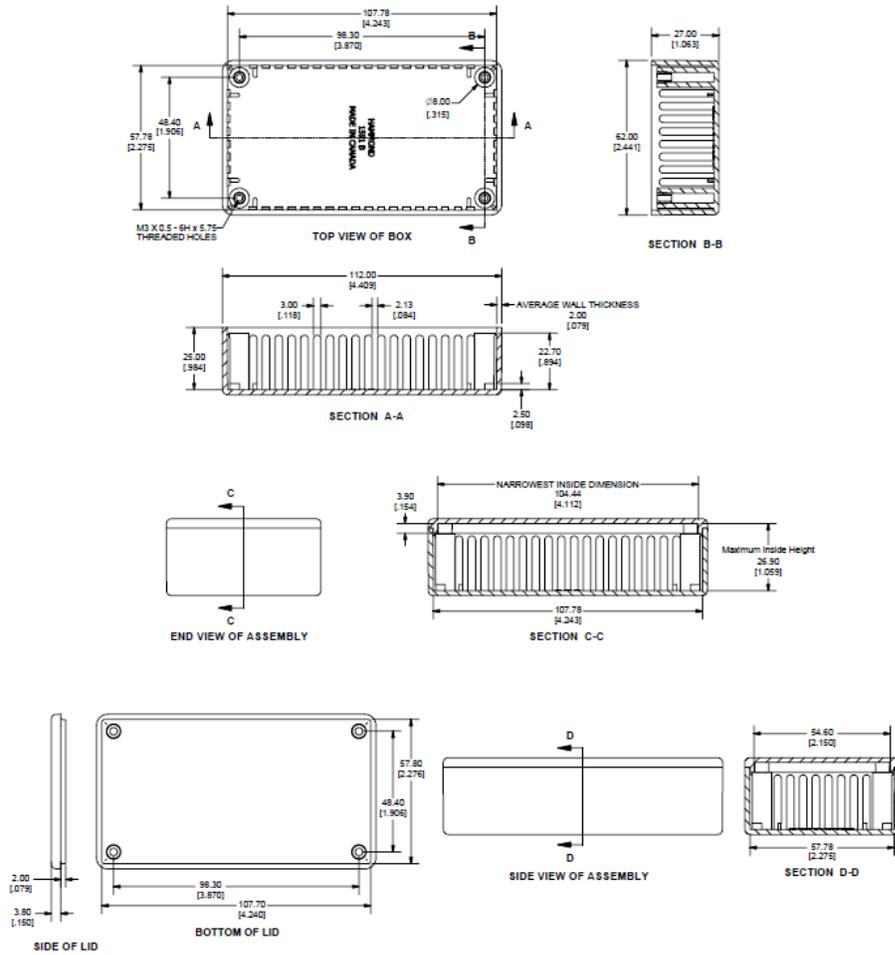


Figura 68: Gabinete Módulo Receptor

Se diseñó la placa del transmisor en base a las especificaciones del gabinete de forma tal de tener sus conectores de entrada y salida de señal sobre una misma cara (de forma similar a los pedales de Electro-Harmonix).

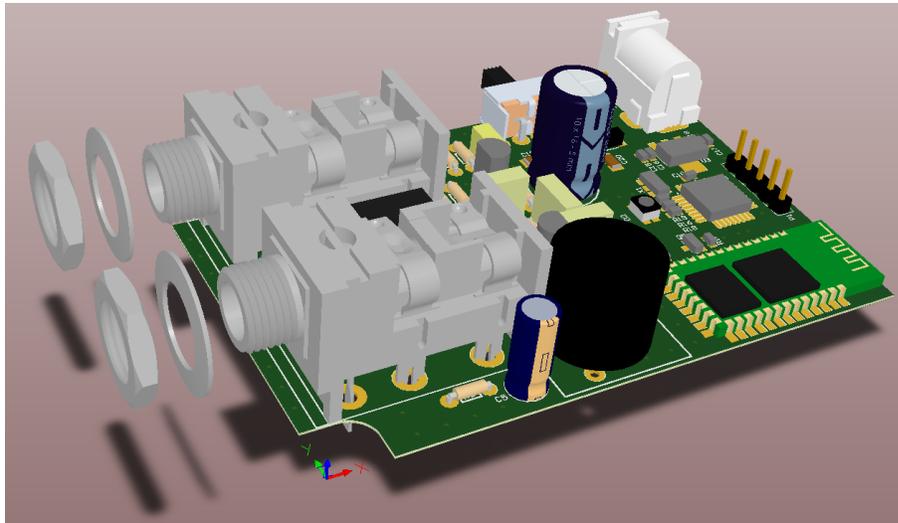


Figura 69: Placa Módulo Receptor

8.4. Detalles de construcción y precauciones especiales de montaje

Módulo transmisor

El PCB del módulo transmisor fue diseñado como se explicó en secciones anteriores en base a las dimensiones de la carcasa. La carcasa utilizada cuenta con dos orificios para poder pasar una cinta de tela que cumple la función de sostén ya sea a la guitarra, al pie o a donde el músico lo crea conveniente. No existen de forma práctica riesgos de dañar el transmisor cuando se ensambla con la carcasa.

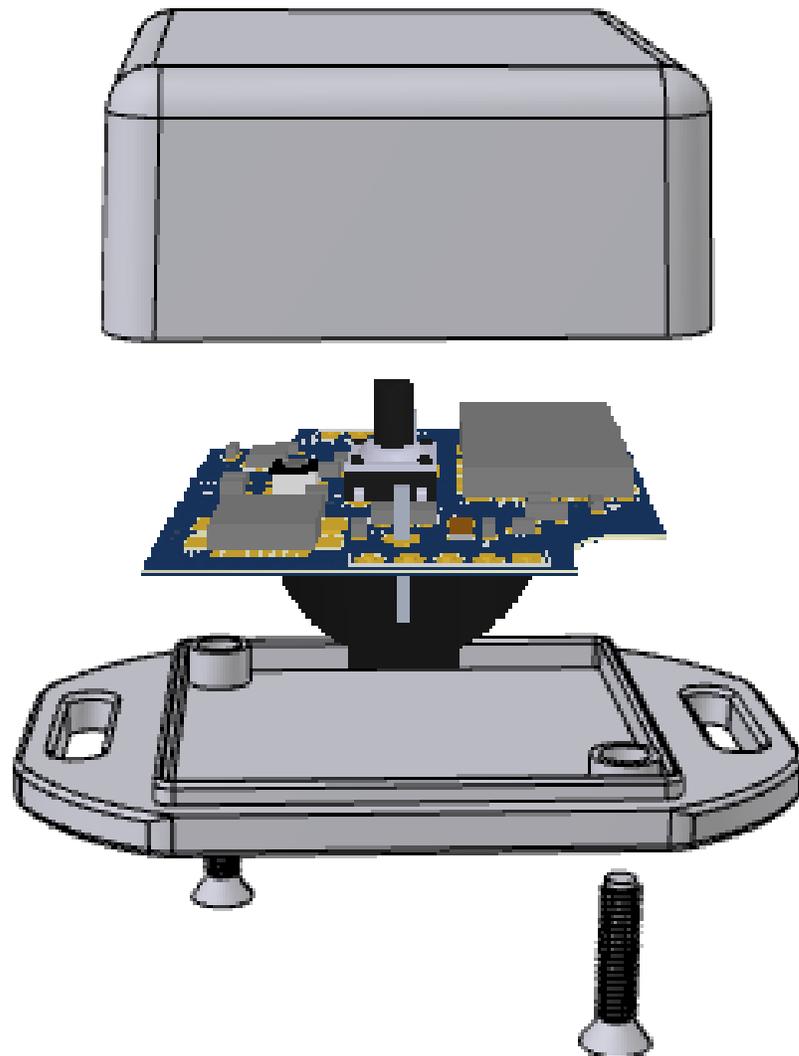


Figura 70: Gabinete y Placa 3D Módulo Transmisor

Módulo receptor

El PCB del módulo receptor fue diseñado en base a las dimensiones de la carcasa de forma tal de que además del módulo propiamente dicho, también entre una batería opcional de 9V. Para el montaje se deben ajustar las tuercas de los conectores de entrada y salida del efecto.

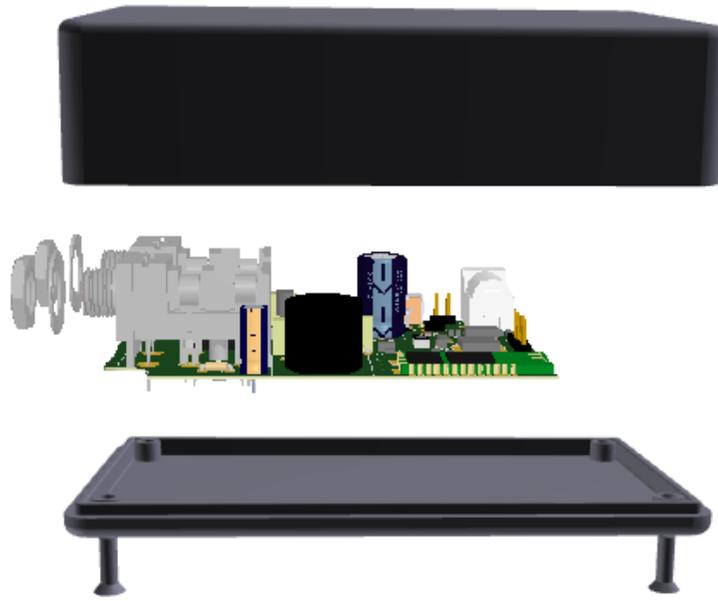


Figura 71: Gabinete y Placa 3D Módulo Receptor

9. Validación del prototipo

9.1. Validación del hardware

La principal validación del hardware radica en el sonido del pedal. A continuación se explican los parámetros a medir.

9.1.1. Plan y protocolos especiales de medición

Las dos variables que más influyen en el sonido del pedal son la respuesta en frecuencia en función de la posición relativa del potenciómetro y la distorsión armónica.

Respuesta en frecuencia Ya que se cuenta con un potenciómetro de pasos discretos, se realizó la medición de la respuesta en frecuencia para cada una de las posiciones posibles. Estas mediciones fueron comparadas con las simulaciones correspondientes.

Distorsión Armónica Se midió la distorsión armónica del pedal. Nótese que en este efecto no se busca minimizar la distorsión ya que, a pesar de no ser un pedal con la intención de distorsionar la señal, parte de su sonido característico viene en función de la alinealidad del transistor de ganancia que está polarizado asimétricamente debido a la bobina. La THD se midió a 1 kHz debido a los estándares de la industria del audio.

9.1.2. Mediciones

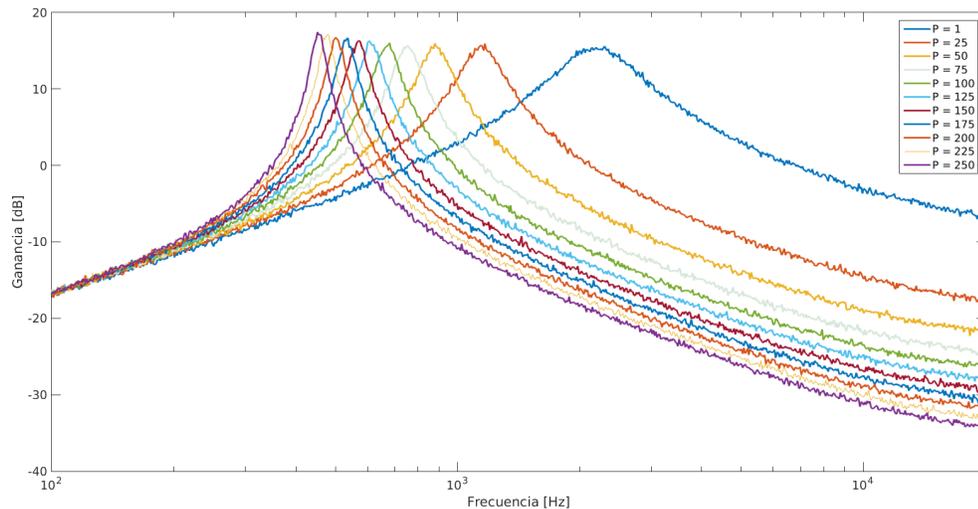


Figura 72: Respuesta en frecuencia

Respuesta en frecuencia

Distorsión Armónica Se midió la distorsión armónica a 1 kHz para todas las posiciones del potenciómetro digital.

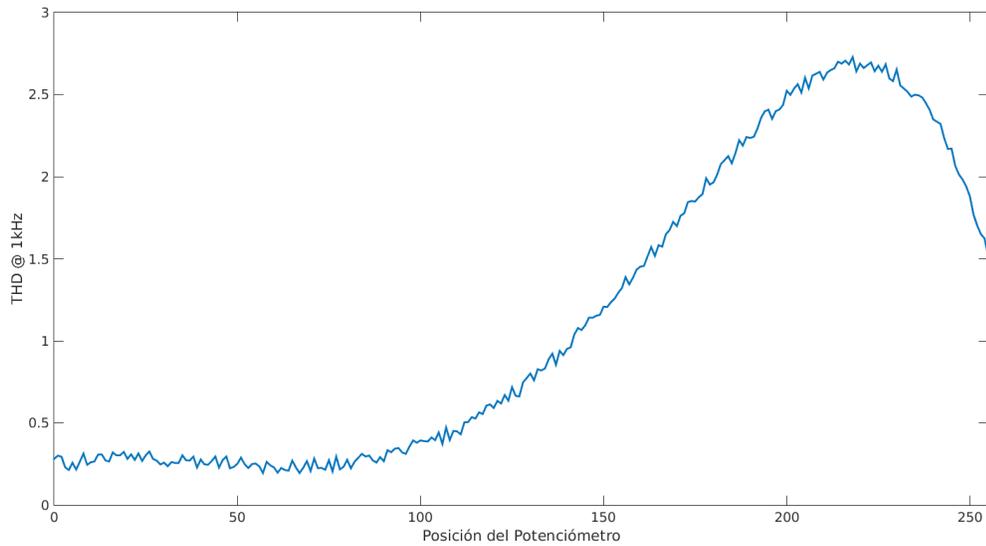


Figura 73: Distorsión Armónica

9.1.3. Resultados

Respuesta en frecuencia Se observó que para las 256 posibles posiciones del potenciómetro digital la respuesta en frecuencia es la esperada de acuerdo a las simulaciones. Se pueden observar las mediciones con pasos de 10 %.

Distorsión armónica Se observó que la distorsión armónica medida a 1kHz varía en función de la posición del potenciómetro y tiene su máximo cuando la frecuencia central del pasabanda es cercana a 2kHz. Esto se debe a que la bobina hace que la alinealidad no sea simétrica como se mostró en secciones anteriores. Se midió un Wah Wah comercial de la firma Jim Dunlop y se observó una distorsión máxima del 3,1 % y una respuesta en función a la posición del pedal similar (no se incluye dicho gráfico ya que en ese caso las variaciones del pedal no estaban cuantizadas), pero nuestro pedal presentó una distorsión máxima de 2.7 %.

Especificaciones Se midieron las especificaciones propuestas en la sección 5.3.1 y se comprobó que todas las magnitudes relevantes se encuentran dentro de los parámetros establecidos salvo el nivel de IP, el mismo deberá ser medido en la versión final de prototipo.

Característica	Mínimo	Medido	Máximo
Autonomía de uso continuo [Hs]	2	3	-
Dimensiones [cm]	-	5.6x4x1.2	10x5x5
Alcance máximo* [m]	10,0	20,0	-
Disipación (25°C) [W]	-	0.05	0.5
Tensión de entrada [V]	2.8	3.3	3.6
Consumo [mA]	-	15	25
Ancho de banda [Hz]	-	5	10.0

Cuadro 15: Especificaciones del transmisor.

Característica	Mínimo	Medido	Máximo
Autonomía de uso continuo [Hs]	2	3	-
Dimensiones [cm]	-	108x6.2x2.7	15x15x5
Alcance máximo* [m]	10.0	20.0	-
Disipación (25°C) [W]	-	0.27	0.5
Tensión de entrada [V]	6	9	15
Consumo [mA]	-	30	50
$f_{min} (k = 0)$ [Hz]	-	440	500
$f_{max} (k = 1)$ [Hz]	2000	2200	-
Impedancia de entrada [Ω]	50k	68k	-
THD @ 1kHz [%]	-	3	5

Cuadro 16: Especificaciones del receptor.

*Alcance mínimo requerido en condiciones de campo abierto.

9.2. Validación del software

La validación del software se realiza en tres etapas.

La primer etapa consta de levantar los datos del acelerómetro y giróscopo, procesarlos y transmitirlos por UART a una computadora para visualizarlos. El conjunto estará calibrado cuando la respuesta al escalón no presente sobrepico.

La segunda etapa consta en probar la comunicación bluetooth. Se envía una secuencia pseudoaleatoria desde el módulo transmisor conocida por el receptor y se evalúa que el mensaje llegue correctamente.

La tercera etapa es la de control del potenciómetro digital. Se realiza un barrido y se mide el punto medio del potenciómetro.

10. Estudios de confiabilidad

En las siguientes secciones se detallarán los cálculos de la confiabilidad del Hardware y la del Software, luego a partir de esos resultados se define la garantía ofrecida.

10.1. Hardware

Se realizó un estudio de confiabilidad de *hardware*. Se asumió un modelo de falla catastrófica para todos los componentes del filtro, por lo cual es de esperar que el MTBF resultante sea relativamente bajo. Se utilizó como referencia la norma militar *MIL – HDBK – 217F*. La ecuación 18 es la que permite realizar el cálculo de los distintos *MTBF* de cada componente, en donde π_i representa los diferentes modificadores por uso en cada componente. Finalmente el *MTBF* total se calcula por medio de la ecuación 19, donde se asume a cada módulo como un componente individual.

$$MTBF_{componente}(1/FIT) = \left(1000 \cdot \lambda_{base} \cdot \prod \pi_i\right)^{-1} \quad (18)$$

$$MTBF_{modulo} [Hs] = \left(\sum \left(\frac{1}{MTBF_{componente-i}}\right)\right)^{-1} \cdot \frac{10^9}{24} \quad (19)$$

Las siguientes tablas presentan el detalle para el cálculo de la confiabilidad de cada componente. Previo a ellas se expone la ecuación correspondiente a cada modelo.

Resistores Se utilizó la especificación MIL-R-55182 (Estilo RN). Los componentes fueron diseñados para soportar un factor de stress¹⁵ menor al 30 % en todos los casos.

$$\lambda = \lambda_b \cdot \pi_R \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \frac{Fallas}{10^6 Hs} \quad (20)$$

Componente	Package	Cantidad	λ_b	π_R	π_Q	π_E	$\lambda_{ef}(FIT)$
510-1 %	Through hole	4	0.0011	1.0	0.1	8.0	387.2
1k-1 %	Through hole	4	0.0011	1.0	0.1	8.0	387.2
1k5-1 %	Through hole	4	0.0011	1.0	0.1	8.0	387.2
10k-1 %	Through hole	1	0.0011	1.0	0.1	8.0	98.6
22k-1 %	Through hole	1	0.0011	1.0	0.1	8.0	98.6
33k-1 %	Through hole	1	0.0011	1.0	0.1	8.0	98.6
100k-1 %	Through hole	1	0.0011	1.1	0.1	8.0	106.5
470k-1 %	Through hole	2	0.0011	1.1	0.1	8.0	213.0
							1770

Cuadro 17: Confiabilidad de resistores.

Capacitores Se utilizó la especificación MIL-C-11015 (Estilo CK). Los componentes fueron diseñados para soportar un factor de stress¹⁶ menor al 40 % en todos los casos.

$$\lambda = \lambda_b \cdot \pi_{CV} \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \frac{Fallas}{10^6 Hs}, \text{ para cerámicos} \quad (21)$$

$$\lambda = \lambda_b \cdot \pi_{CV} \cdot \pi_{SR} \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \frac{Fallas}{10^6 Hs}, \text{ para Electrolíticos} \quad (22)$$

¹⁵Relación entre la potencia disipada y la potencia nominal del componente. Por ejemplo para un resistor de 100Ω y 1/4W en el que se disipa una potencia de 100mW, el factor de stress es de $\frac{0.1}{0.25} = 0.4$.

¹⁶Relación entre la tensión aplicada y la tensión nominal del componente. Por ejemplo para un capacitor de 100nF y 16V el cual se usa para desacoplar una fuente de 5V, el factor de stress es de $\frac{5}{16} = 0.3125$.

Componente	Package	Cantidad	λ_b	π_{CV}	π_{SR}	π_Q	π_E	$\lambda_{ef}(FIT)$
10nF-X7R	Through hole	2	0.0035	1.0	-	0.1	9.0	630.0
100nF-X7R	Through hole	2	0.0035	1.3	-	0.1	9.0	819.0
220nF-X7R	Through hole	2	0.0035	1.3	-	0.1	9.0	819.0
4,7 μF	Through hole	1	0.0150	1.2	0.27	0.1	9.0	437.0
							2705.0	

Cuadro 18: Confiabilidad de capacitores.

Otros componentes

$$\lambda = \lambda_b \cdot \pi_C \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \frac{Fallas}{10^6 Hs}, \text{ para inductores} \quad (23)$$

$$\lambda = \lambda_b \cdot \pi_T \cdot \pi_R \cdot \pi_S \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \frac{Fallas}{10^6 Hs}, \text{ para transistores} \quad (24)$$

Componente	Encapsulado	Cantidad	λ_b	π_T	π_R	π_S	π_Q	π_C	π_E	$\lambda_{ef}(FIT)$
L - 500mH	Toroide	1	0.0006	-	-	-	0.3	1.0	12.0	216.0
MPSA18	TO92	2	0.18	3.0	0.77	0.29	5.0	-	5.0	1205.8
										1421.8

Cuadro 19: Confiabilidad de otros componentes.

Por lo tanto, según la ecuación 19 el MTBF del módulo resulta ser de: 177Hs. Como se dijo al principio, es un valor bastante pesimista debido a que se asumió que toda falla es catastrófica. Por lo tanto si se toman en cuenta solo los transistores, integrados y electrolíticos como agentes principales de falla, el MTBF resulta ser de 14000Hs.

10.2. Software

Para la confiabilidad del software se proponen usar los modelos de predicción y estimación. La predicción utiliza datos históricos para predecir fiabilidad en algún momento futuro, mientras que el modelo de estimación requiere datos provenientes del desarrollo actual y estima tanto la fiabilidad presente como la futura.

10.2.1. Predicción

Para la predicción se utilizó el modelo de Musa o del tiempo de ejecución. La ecuación que permite llevar adelante la predicción del modelo es la siguiente:

$$\lambda_0 = k \cdot p \cdot \omega_0 \quad (25)$$

Donde k es una constante cuantizada para la estructura dinámica del programa y de las máquinas. Como no se conoce su valor expresamente, se adoptó el valor típico de $4,2 \cdot 10^{-7}$. Por otro lado, p es la estimación del número de ejecuciones por unidad de tiempo, que se calcula de la siguiente forma:

$$p = \frac{r}{I} = \frac{r}{n \cdot ER} \quad (26)$$

Siendo r el promedio de la velocidad de ejecución de instrucciones e I la cantidad de instrucciones del código fuente en el nivel de máquina. La velocidad promedio r para el lenguaje C , el microprocesador usado y su respectivo cristal de 4MHz se la estimó en $4 \cdot 10^5 \frac{\text{instrucciones}}{\text{seg}}$ ya que no se usa ni el PLL ni el FLL para modificar la frecuencia del procesador y el lenguaje C es más alto que el Assembler.

Para el cálculo de I se requiere conocer la cantidad n de líneas de código fuente (se expresa en unidades de *SLOC* por sus siglas en inglés que devienen de *Source Line Of Code*), las cuales son de aproximadamente 2000 según los últimos prototipos y el *Expansion Ratio (ER)* que depende del lenguaje

y permite relacionar la cantidad de líneas de un lenguaje con la cantidad de instrucciones de más bajo nivel ($ER = 2,5$ ya que se usó lenguaje C).

Finalmente, ω_0 es la estimación del número inicial de fallas en el programa, que se puede calcular como:

$$\omega_0 = N \cdot B \quad (27)$$

Siendo N el número total de defectos inherentes y B la proporción de defectos que se convierten en fallas. Se adoptó como valor típico $B = 95\%$ y por lo tanto una relación de fallas sobre SLOC de 6/1000:

$$\omega_0 = \frac{6 \text{ fallas}}{1000 \text{ SLOC}} \quad (28)$$

Todos estos valores conducen a una tasa de fallas dada por el siguiente cálculo:

$$\lambda_0 = k \cdot \left(\frac{4 \cdot 10^5 \frac{\text{instrucciones}}{\text{seg}}}{2000 \text{ SLOC} \cdot 2,5 \frac{\text{instrucciones}}{\text{SLOC}}} \right) \cdot \frac{6 \text{ fallas}}{1000 \text{ SLOC}} \quad (29)$$

Todos estos valores conducen a una tasa de fallas de: $\lambda_0 \cong 8,93 \cdot 10^{-5} \frac{\text{fallas}}{\text{seg}}$. Es decir un MTBF aproximado de 11200 Hs .

10.2.2. Estimación

El modelo de Shooman es similar al modelo exponencial general excepto que se normaliza cada falla por las líneas de código. La ventaja del método de Shooman es que al normalizar los errores por línea de código el resultado se ajusta a cambios en la longitud del software.

El modelo propuesto por Shooman es el siguiente, y se observa que con mayor tiempo de depuración ζ aumenta la fiabilidad del sistema (función exponencial decreciente).

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (30)$$

Donde λ está definido de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\lambda = -k \cdot \varepsilon_r t \quad (31)$$

Siendo $\varepsilon_r(\zeta)$ es la tasa residual de corrección de errores que depende de la cantidad de errores corregidos al cabo del tiempo ζ (tiempo de depuración o corrección de código) y de la tasa de errores totales ε_T :

$$\varepsilon_r(\zeta) = \varepsilon_T - \varepsilon_c(\zeta) = \frac{E_T}{I_T} - \varepsilon_c(\zeta) \quad (32)$$

Donde E_T es la cantidad inicial de errores e I_T es la cantidad de instrucciones de máquina en el programa, para el caso de este proyecto este número es de 2000 líneas aproximadamente.

Finalmente, el MTBF se calcula como la inversa λ , siendo λ la definida en la ecuación 31.

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{k \cdot \left(\frac{E_T}{I_T} - \varepsilon_c(\zeta) \right)} \quad (33)$$

La dificultad de proseguir con esta estimación es que no se conoce la cantidad inicial de errores E_T ni el valor de k . Para poder estimar estas variables se deben tomar 2 instantes en el proceso de desarrollo del software.

Para hacerlo se propone el siguiente desarrollo.

Suponiendo que tras la ejecución n -ésima el código falló r veces. Sea t_i el tiempo de una ejecución exitosa y t_j el de una fallida. El tiempo total T de funcionamiento será:

$$T = \sum_{i=1}^{n-r} t_i + \sum_{j=1}^r t_j \quad (34)$$

Asumiendo que el modelo de fallas es exponencial y que nos encontramos en el período de vida útil del producto, es decir se ha superado la mortalidad infantil, el MTBF estará dado por:

$$MTBF = \frac{1}{\lambda_i} = \frac{T}{r} \quad (35)$$

Entonces, igualando las ecuaciones 33 y 35 se pueden tener la siguiente información para 2 instantes del desarrollo (denotados a y b)

$$\frac{T_a}{r_a} = \frac{1}{\lambda_a} = \frac{1}{k \cdot \left(\frac{E_T}{I_T} - \varepsilon_c(\zeta_a) \right)} \quad (36)$$

$$\frac{T_b}{r_b} = \frac{1}{\lambda_b} = \frac{1}{k \cdot \left(\frac{E_T}{I_T} - \varepsilon_c(\zeta_b) \right)} \quad (37)$$

En estas expresiones T_i es el tiempo acumulado de ejecución durante el cual han aparecido las r_i fallas, luego de haberse corregido $\varepsilon_c(\zeta)$ errores:

$$\hat{E}_T = - \frac{\left[\frac{\lambda_b}{\lambda_a} \right] \cdot \varepsilon_c(\zeta_a) - \varepsilon_c(\zeta_b)}{\frac{\lambda_b}{\lambda_a} - 1} \quad (38)$$

$$\hat{k} = \lambda_a \frac{I_T}{\hat{E}_T - \varepsilon_c(\zeta_a)} \quad (39)$$

Los puntos de referencia fueron durante la primera y segunda semana de Febrero del 2016. La información documentada es la siguiente:

$$a : \begin{cases} T_a = 7 \text{ días} = 168 \text{ Hs} \\ r_a = 1 \text{ falla catastrófica sin corregir} \\ \varepsilon_c(\zeta_a) = 3 \text{ correcciones} \end{cases} \quad (40)$$

$$b : \begin{cases} T_b = 7 \text{ días} = 168 \text{ Hs} \\ r_b = 2 \text{ fallas catastrófica sin corregir} \\ \varepsilon_c(\zeta_b) = 15 \text{ correcciones} \end{cases} \quad (41)$$

De esta información y haciendo uso de las ecuaciones citadas anteriormente se puede llegar a que el valor de k es de 1,9841 mientras que el de E_T es de 9. Esto quiere decir que originalmente había $15 + 3 + 9 = 27$ errores, de los cuales se corrigieron 18 al cabo de las 2 semanas de análisis. Finalmente, los valores aquí hallados conducen a un $\lambda \cong 1,39 \cdot 10^{-4}$ y a un MTBF aproximado de 7200 Hs.

10.3. Garantía

En cuanto a los regimenes de garantía ofrecidos por los productos de la competencia, no se han encontrado especificaciones de MTBF. De la encuesta realizada se infiere que no es común que se rompan, pero se podría haber preguntado por este dato de forma explícita.

En el hardware propuesto, tal cual se vio en esta sección, se obtuvo un MTBF de 14000Hs mientras que el del software resultó ser de 11200Hs. Si se considera el modelo serie de ambos, el MTBF resultante es de 6200Hs aproximadamente, lo cual, asumiendo un uso semanal pesimista de 15hs, llevaría a proponer una garantía de 3 años. Por lo que se propone una garantía de 24 meses.

11. Conclusiones

11.1. Objetivos alcanzados

En este informe se mostró el desarrollo de un pedal Wah Wah inalámbrico como un producto comercial. Se alcanzó la funcionalidad propuesta: El transmisor construido permitió interpretar los movimientos del usuario y enviarlos mediante un protocolo Bluetooth al receptor, donde estos son procesados y aplicados al filtrado pasabanda tradicional de los pedales Wah Wah. Todas las especificaciones propuestas a partir de los requerimientos fueron cumplidas (vease a sección “Validación del prototipo”).

Se comprobó la factibilidad de la propuesta inicial en los aspectos más importantes del pedal diseñado. El análisis técnico y el armado del prototipo dejaron en evidencia que el circuito puede seguir siendo estudiado y optimizado para futuras versiones del pedal y hasta ser escalable a otros efectos musicales, tal cual estaba planeado originalmente y así se pueda lanzar un nuevo producto cuando el ciclo de vida de este llegue a su apogeo. Desde el punto de vista legal, el proyecto demuestra ser viable ya que no hay patentes o restricciones legales vigentes que atenten contra su producción, y los costos de certificación no son obligatorios por ley para su comercialización.

En cuanto al análisis financiero del proyecto, se debe mencionar que su rentabilidad se maximiza a los 3 años del lanzamiento debido al apogeo del ciclo de vida del producto y a la saturación del mercado (ver figura 74). No obstante eso, el proyecto a 3 años tiene una VAN de \$ 64,803.44 (TREMA del 31.25 % nominal anual), que se debe dividir entre los 4 integrantes del grupo, un período de repago de 20 meses y una TIR del 43 %. Además, el pronóstico es optimista porque asume que en los meses de mayor crecimiento se van a alcanzar todas las ventas posibles en el mercado, es decir, las 250 unidades al mes (ver anexo financiero) y aún así no se logran suficientes beneficios.

En síntesis, resulta claro que el proyecto por si solo no puede extenderse por 5 años ya que su ciclo de vida es menor y las ventas no son suficientes (ver figura 74). También se concluye que el producto no es recomendado para ser lanzado por si solo, aún a 3 años, aunque si podría llegar a ser el puntapie inicial dentro de una línea de productos para músicos donde se lance un nuevo producto cuando este empiece a cumplir su ciclo y así sucesivamente con los nuevos productos. O bien, puede ser un proyecto más rentable para alguna empresa que ya se encuentre asentada en el mercado y no tenga que afrontar todos los costos fijos e iniciales que este proyecto tiene (marketing, derechos de importación, espacio físico, bienes de uso, etc). Si se reducen los costos fijos (prorrateandolos en otros productos de la misma empresa) y se tiene una estructura comercial armada, el producto puede aumentar hasta un 50 % su margen de ganancias, este sería el escenario óptimo para el lanzamiento del Wah Wah inalámbrico que se ha desarrollado.

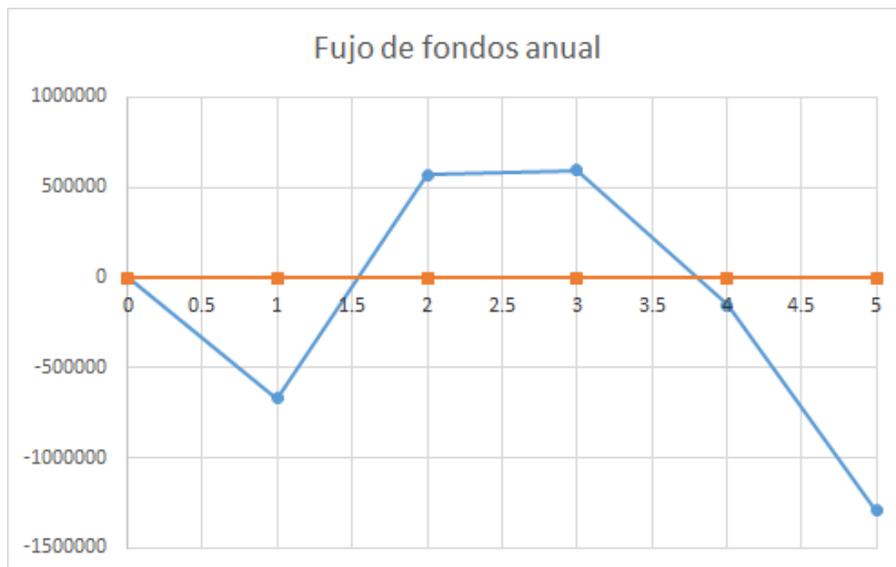


Figura 74: Flujo de fondos acumulado del proyecto en 5 años.

11.2. Fallos o recomendaciones para futuros diseños

A pesar de cumplir con la funcionalidad esperada, varios cambios y mejoras pueden explorarse con el fin de mejorar el producto y cumplir aún más con las expectativas del mercado. A continuación, se detallan algunos de los principales motivos de estudio en posteriores trabajos:

- Reducción del consumo: Aunque se cumplieron las especificaciones de consumo y autonomía, se pueden trabajar para mejorar el rendimiento del producto, ya sea para disminuir su peso o bien aumentar la autonomía de la batería. Esto puede realizarse reemplazando los módulos Bluetooth como se explica en el siguiente ítem.
- Evaluar reemplazar los módulos Bluetooth por los módulos de transmisión GMSK en 2.4GHz NRF24L01+ debido a que estos últimos son considerablemente más baratos ($US\$9,00$ Vs $US\$3,00$). La desventaja del cambio es que se pierde compatibilidad con los celulares.
- Reemplazo del inductor: El inductor sigue siendo el cuello de botella para el diseño del pedal, si bien se propone construirlo artesanalmente, se le debería reducir su valor para abaratar costos. Tampoco puede ser eliminado porque es un requisito del mercado que el inductor esté presente en la etapa de filtrado del Wah Wah.
- Diseño del gabinete: Tal cual se reveló en la encuesta realizada al comienzo del proyecto, la estética es sumamente importante y por esta razón debe ser considerado un diseño de gabinete que cumpla con los estándares del mercado. Esto no se ha hecho aún.
- Estimación de tiempos: En cuanto a los plazos previstos para el proyecto, se había estimado un período de 130 días, es decir que debería haber terminado a fines de Noviembre de 2015, sin embargo se había tomado la premisa que cada miembro del equipo le iba a poder dedicar el tiempo que estaba estipulado a cada tarea. Eso fue un grave error ya que surgieron cuestiones personales, laborales¹⁷ y hasta culturales¹⁸ que obligaron a posponer tareas y a dedicarle menos recursos que los necesarios. Esto llevó a que existan períodos de tiempo donde ninguna tarea se estaba ejecutando. Tampoco se consideraron vacaciones¹⁹ y así fue que la duración del proyecto se extendió hasta el 26 de Abril de 2016, demandando 281 días en total. En otras palabras, se requirió un 116% más de días que los planificados para realizar todas las tareas, aunque si se descuentan los tiempos muertos debido a los días perdidos por vacaciones y el año nuevo chino, los días extras fueron del 70%, es decir 100 días de más a los 130 originales en lugar de 150. Debe ser destacada la diferencia entre el tiempo calendario que demanda una tarea y las horas que a ella se dedican. La planificación que fue tratada en la sección 6.2 asignaba una determinada cantidad de horas a cada tarea, las cuales se pudieron cumplir con un error del $\pm 10\%$, aunque esas horas de trabajo se hayan realizado en mucho más tiempo calendario de que se había contemplado originalmente. En otras palabras, la estimación de los recursos humanos que se le debían asignar a cada tarea fue certera (por ejemplo: 30hs de trabajo), en contraste con el tiempo calendario que terminó demandando esa tarea (en vez de realizarla en una semana, dedicando 6hs por día, se le pudo dedicar menos tiempo y por eso su duración calendario fue mayor).

¹⁷Todos los integrantes del equipo comenzamos a trabajar y eso impidió que le podamos dedicar el tiempo necesario al proyecto.

¹⁸Se enviaron a fabricar los PCBs del prototipo a China. Se tuvo especial cuidado de mandar el diseño antes de año nuevo chino ya que la empresa fabricante de PCBs se iba a tomar 1 mes de vacaciones por dicho motivo. No obstante el recaudo tomado, el fabricante nos contactó después que hicimos el envío porque necesitaban una especificación más para comenzar la fabricación. Esa desinteligencia provocó que nuestro pedido no haya arrancado antes del año nuevo chino y eso demoró el desarrollo durante 3 semanas.

¹⁹En la planificación original del proyecto no se contemplaban vacaciones porque el desarrollo del mismo se iba a concretar antes del primer verano, sin embargo como los plazos se extendieron, las vacaciones aumentaron en un mes el tiempo realización del proyecto.

Anexo de seguridad

La norma IEC 529 da los lineamientos para la clasificación del sellado de sistemas electrónicos según su eficacia ante la intrusión de cuerpos extraños como herramientas, dedos, polvo o humedad. Este sistema usa la sigla IP, la cual significa “*International Protection*” seguida de 2 dígitos.

El primer dígito contempla la protección contra partículas móviles y el ingreso de cuerpos extraños sólidos. El segundo dígito representa el grado de protección frente a la exposición ante agua.

1º dígito	Protección ante objetos sólidos
0	Sin protección especial.
1	Grandes partes del cuerpo como las manos y objetos sólidos con $\emptyset \geq 50mm$.
2	Dedos y objetos sólidos con $\emptyset \geq 12mm$ y menores a $80mm$ de largo.
3	Herramientas, cables y objetos sólidos con $\emptyset \geq 2,5mm$.
4	Objetos sólidos con espesor o $\emptyset \geq 1mm$.
5	Cantidad de polvo que pueda interferir con la operación normal del equipo.
6	Hermético al polvo.
-	-
-	-

Cuadro 20: Tabla de códigos IP según IEC 529. Primer dígito.

2º dígito	Protección ante humedad
0	Sin protección especial.
1	Goteo de agua.
2	Goteo vertical de agua.
3	Rociado de agua.
4	Salpicado de agua.
5	Flujo de agua proveniente de una canilla.
6	Potentes chorros de agua.
7	Inmersión.
8	Sumersión.

Cuadro 21: Tabla de códigos IP según IEC 529. Segundo dígito.

Todos los primeros y segundos dígitos hasta el número 6 inclusive de ambas categorías implican conformidad con todos los dígitos inferiores. Los dígitos 7 y 8 no implican cumplimiento con los dígitos 5 y 6 salvo que se lo especifique de forma explícita.

Anexo financiero

1ª etapa						
Mes	1	2	3	4	5	6
Ventas	0	30	90	100	100	120
Ingresos por ventas	\$0.00	\$5,400.00	\$16,200.00	\$18,000.00	\$18,000.00	\$21,600.00
Impuesto al ingreso bruto	\$0.00	-\$162.00	-\$486.00	-\$540.00	-\$540.00	-\$648.00
Diferencia IVA	\$0.00	-\$576.63	-\$1,729.90	-\$1,922.11	-\$1,922.11	-\$2,306.53
Sueldos	-\$4,857.60	-\$4,857.60	-\$4,857.60	-\$4,857.60	-\$4,857.60	-\$4,857.60
Cargas sociales	-\$6,208.98	-\$6,208.98	-\$6,208.98	-\$6,208.98	-\$6,208.98	-\$6,208.98
Viáticos	-\$50.00	-\$50.00	-\$50.00	-\$50.00	-\$50.00	-\$50.00
Marketing	-\$1,300.00	-\$200.00	-\$200.00	-\$200.00	-\$200.00	-\$200.00
Inmueble	-\$1,200.00	-\$300.00	-\$300.00	-\$300.00	-\$300.00	-\$300.00
Trámite importador	-\$2,000.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Bienes de uso	-\$600.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Costos de materiales por 6 meses	-\$2,077.50	-\$6,232.50	-\$6,925.00	-\$6,925.00	-\$8,310.00	-\$8,310.00
EBIT	-\$18,294.08	-\$13,187.72	-\$4,557.48	-\$3,003.69	-\$4,388.69	-\$1,281.11
EBIT en pesos	-\$274,411.26	-\$197,815.75	-\$68,362.22	-\$45,055.38	-\$65,830.38	-\$19,216.70
Impuesto a las ganancias	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Flujo de fondos	-\$274,411.26	-\$197,815.75	-\$68,362.22	-\$45,055.38	-\$65,830.38	-\$19,216.70
FF acum.	-\$274,411.26	-\$472,227.01	-\$540,589.23	-\$585,644.60	-\$651,474.98	-\$670,691.68

Sueldo	\$1,500.00
Precio de venta	\$180.00
Alquiler	\$300.00
Estación soldadora	\$200.00
Horno	\$300.00
Herramientas varias	\$100.00
Stock de seguridad	5%
Materiales	\$69.25
Viáticos	\$50.00
Marketing	\$200.00
Página web	\$200.00
Diseñadores gráficos	\$900.00

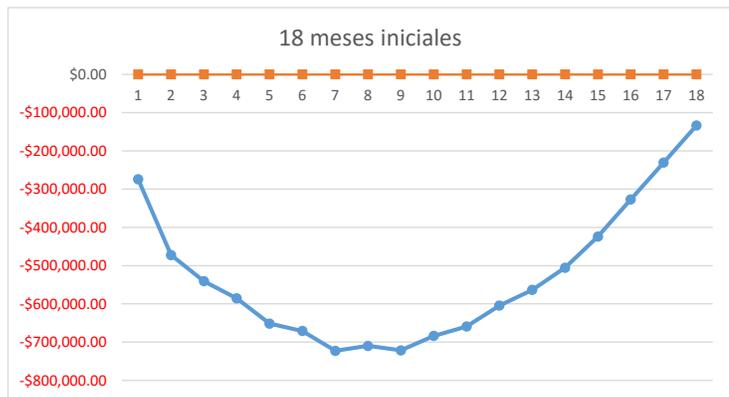
Ingresos brutos	3.0%
Impuesto al cheque	1.2%
Impuesto a las ganancias	35%
Cargas sociales	54%
IVA	21.0%
TREMA	31.25%
DÓLAR	\$ 15.00

TIR a 4 años	33.89%
TIR a 3 años	42.53%
VAN a 5 años	-\$318,756.04
VAN a 4 años	\$13,459.73
VAN a 3 años	\$64,803.44
VAN a 3 años en USD	\$4,320.23

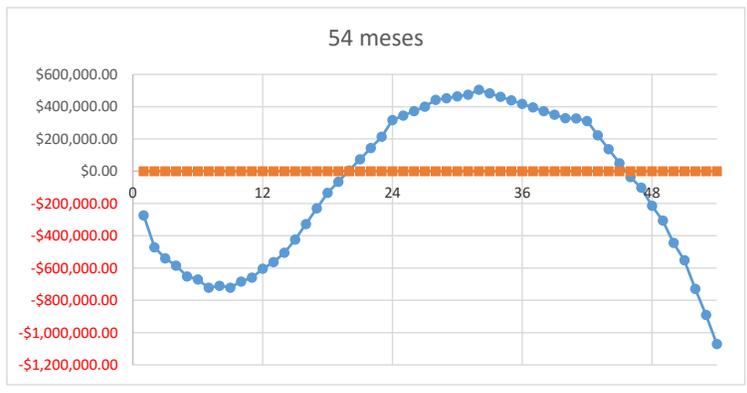
2º año						
7	8	9	10	11	12	13
120	150	150	180	180	200	200
\$21,600.00	\$27,000.00	\$27,000.00	\$32,400.00	\$32,400.00	\$36,000.00	\$36,000.00
-\$648.00	-\$810.00	-\$810.00	-\$972.00	-\$972.00	-\$1,080.00	-\$1,080.00
-\$2,306.53	-\$2,883.16	-\$2,883.16	-\$3,459.79	-\$3,459.79	-\$3,844.21	-\$3,844.21
-\$4,857.60	-\$4,857.60	-\$4,857.60	-\$4,857.60	-\$4,857.60	-\$4,857.60	-\$4,857.60
-\$6,208.98	-\$6,208.98	-\$6,208.98	-\$6,208.98	-\$6,208.98	-\$6,208.98	-\$6,208.98
-\$50.00	-\$50.00	-\$50.00	-\$50.00	-\$50.00	-\$50.00	-\$50.00
-\$200.00	-\$200.00	-\$200.00	-\$200.00	-\$200.00	-\$200.00	-\$200.00
-\$300.00	-\$300.00	-\$300.00	-\$300.00	-\$300.00	-\$300.00	-\$300.00
\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
-\$100.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
-\$10,387.50	-\$10,387.50	-\$12,465.00	-\$12,465.00	-\$13,850.00	-\$13,850.00	-\$15,235.00
-\$3,458.61	\$1,302.75	-\$774.75	\$3,886.62	\$2,501.62	\$5,609.20	\$4,224.20
-\$51,879.20	\$19,541.32	-\$11,621.18	\$58,299.33	\$37,524.33	\$84,138.01	\$63,363.01
\$0.00	-\$6,839.46	\$0.00	-\$20,404.77	-\$13,133.52	-\$29,448.30	-\$22,177.05
-\$51,879.20	\$12,701.86	-\$11,621.18	\$37,894.57	\$24,390.82	\$54,689.71	\$41,185.96
-\$722,570.88	-\$709,869.02	-\$721,490.20	-\$683,595.64	-\$659,204.82	-\$604,515.11	-\$563,329.15

Resumen					
Año	1	2	3	4	5
Flujo de fondos	-\$670,691.68	\$536,904.42	\$597,203.85	-\$152,364.75	-\$1,293,947.93
FF acum.	-\$670,691.68	-\$133,787.26	\$463,416.59	\$311,051.84	-\$982,896.09

14	15	16	17	18	19	20
220	240	250	250	250	250	250
\$39,600.00	\$43,200.00	\$45,000.00	\$45,000.00	\$45,000.00	\$45,000.00	\$45,000.00
-\$1,188.00	-\$1,296.00	-\$1,350.00	-\$1,350.00	-\$1,350.00	-\$1,350.00	-\$1,350.00
-\$4,228.64	-\$4,613.06	-\$4,805.27	-\$4,805.27	-\$4,805.27	-\$4,805.27	-\$4,805.27
-\$4,857.60	-\$4,857.60	-\$4,857.60	-\$4,857.60	-\$4,857.60	-\$6,072.00	-\$6,072.00
-\$6,208.98	-\$6,208.98	-\$6,208.98	-\$6,208.98	-\$6,208.98	-\$7,761.23	-\$7,761.23
-\$50.00	-\$50.00	-\$50.00	-\$50.00	-\$50.00	-\$50.00	-\$50.00
-\$200.00	-\$200.00	-\$200.00	-\$200.00	-\$200.00	-\$200.00	-\$200.00
-\$300.00	-\$300.00	-\$300.00	-\$300.00	-\$300.00	-\$300.00	-\$300.00
\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	-\$100.00	\$0.00
-\$16,620.00	-\$17,312.50	-\$17,312.50	-\$17,312.50	-\$17,312.50	-\$17,312.50	-\$17,312.50
\$5,946.78	\$8,361.86	\$9,915.65	\$9,915.65	\$9,915.65	\$7,049.00	\$7,149.00
\$89,201.69	\$125,427.87	\$148,734.71	\$148,734.71	\$148,734.71	\$105,735.02	\$107,235.02
-\$31,220.59	-\$43,899.75	-\$52,057.15	-\$52,057.15	-\$52,057.15	-\$37,007.26	-\$37,532.26
\$57,981.10	\$81,528.11	\$96,677.56	\$96,677.56	\$96,677.56	\$68,727.76	\$69,702.76
-\$505,348.06	-\$423,819.94	-\$327,142.38	-\$230,464.82	-\$133,787.26	-\$65,059.50	\$4,643.26



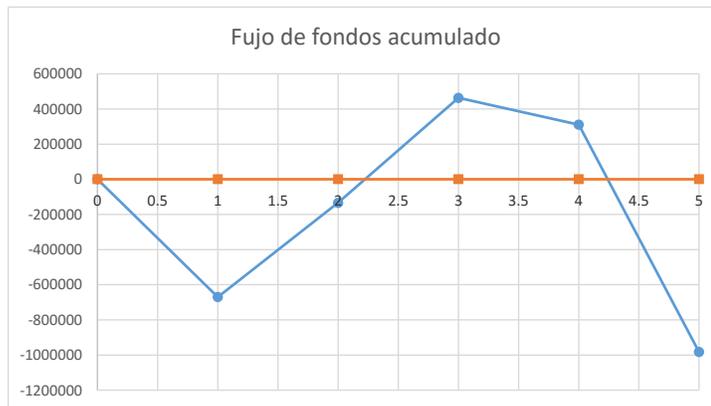
3º año						
21	22	23	24	25	26	27
250	250	250	250	200	200	200
\$45,000.00	\$45,000.00	\$45,000.00	\$45,000.00	\$36,000.00	\$36,000.00	\$36,000.00
-\$1,350.00	-\$1,350.00	-\$1,350.00	-\$1,350.00	-\$1,080.00	-\$1,080.00	-\$1,080.00
-\$4,805.27	-\$4,805.27	-\$4,805.27	-\$4,805.27	-\$3,844.21	-\$3,844.21	-\$3,844.21
-\$6,072.00	-\$6,072.00	-\$6,072.00	-\$6,072.00	-\$6,072.00	-\$6,072.00	-\$6,072.00
-\$7,761.23	-\$7,761.23	-\$7,761.23	-\$7,761.23	-\$7,761.23	-\$7,761.23	-\$7,761.23
-\$50.00	-\$50.00	-\$50.00	-\$50.00	-\$50.00	-\$50.00	-\$50.00
-\$200.00	-\$200.00	-\$200.00	-\$200.00	-\$200.00	-\$200.00	-\$200.00
-\$300.00	-\$300.00	-\$300.00	-\$300.00	-\$300.00	-\$300.00	-\$300.00
\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
-\$17,312.50	-\$17,312.50	-\$17,312.50	-\$13,850.00	-\$13,850.00	-\$13,850.00	-\$13,850.00
\$7,149.00	\$7,149.00	\$7,149.00	\$10,611.50	\$2,842.55	\$2,842.55	\$2,842.55
\$107,235.02	\$107,235.02	\$107,235.02	\$159,172.52	\$42,638.32	\$42,638.32	\$42,638.32
-\$37,532.26	-\$37,532.26	-\$37,532.26	-\$55,710.38	-\$14,923.41	-\$14,923.41	-\$14,923.41
\$69,702.76	\$69,702.76	\$69,702.76	\$103,462.13	\$27,714.91	\$27,714.91	\$27,714.91
\$74,346.02	\$144,048.78	\$213,751.53	\$317,213.67	\$344,928.58	\$372,643.49	\$400,358.40



28	29	30	31	32	33	34
200	180	180	180	180	150	150
\$36,000.00	\$32,400.00	\$32,400.00	\$32,400.00	\$32,400.00	\$27,000.00	\$27,000.00
-\$1,080.00	-\$972.00	-\$972.00	-\$972.00	-\$972.00	-\$810.00	-\$810.00
-\$3,844.21	-\$3,459.79	-\$3,459.79	-\$3,459.79	-\$3,459.79	-\$2,883.16	-\$2,883.16
-\$6,072.00	-\$6,072.00	-\$6,072.00	-\$6,072.00	-\$6,072.00	-\$6,072.00	-\$6,072.00
-\$7,761.23	-\$7,761.23	-\$7,761.23	-\$7,761.23	-\$7,761.23	-\$7,761.23	-\$7,761.23
-\$50.00	-\$50.00	-\$50.00	-\$50.00	-\$50.00	-\$50.00	-\$50.00
-\$200.00	-\$200.00	-\$200.00	-\$200.00	-\$200.00	-\$200.00	-\$200.00
-\$300.00	-\$300.00	-\$300.00	-\$300.00	-\$300.00	-\$300.00	-\$300.00
\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
\$0.00	\$0.00	\$0.00	-\$100.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
-\$12,465.00	-\$12,465.00	-\$12,465.00	-\$12,465.00	-\$10,387.50	-\$10,387.50	-\$10,387.50
\$4,227.55	\$1,119.98	\$1,119.98	\$1,019.98	\$3,197.48	-\$1,463.89	-\$1,463.89
\$63,413.32	\$16,799.64	\$16,799.64	\$15,299.64	\$47,962.14	-\$21,958.37	-\$21,958.37
-\$22,194.66	-\$5,879.88	-\$5,879.88	-\$5,354.88	-\$16,786.75	\$0.00	\$0.00
\$41,218.66	\$10,919.77	\$10,919.77	\$9,944.77	\$31,175.39	-\$21,958.37	-\$21,958.37
\$441,577.05	\$452,496.82	\$463,416.59	\$473,361.36	\$504,536.75	\$482,578.38	\$460,620.00



4º año						
35	36	37	38	39	40	41
150	150	150	150	150	150	150
\$27,000.00	\$27,000.00	\$27,000.00	\$27,000.00	\$27,000.00	\$27,000.00	\$27,000.00
-\$810.00	-\$810.00	-\$810.00	-\$810.00	-\$810.00	-\$810.00	-\$810.00
-\$2,883.16	-\$2,883.16	-\$2,883.16	-\$2,883.16	-\$2,883.16	-\$2,883.16	-\$2,883.16
-\$6,072.00	-\$6,072.00	-\$6,072.00	-\$6,072.00	-\$6,072.00	-\$6,072.00	-\$6,072.00
-\$7,761.23	-\$7,761.23	-\$7,761.23	-\$7,761.23	-\$7,761.23	-\$7,761.23	-\$7,761.23
-\$50.00	-\$50.00	-\$50.00	-\$50.00	-\$50.00	-\$50.00	-\$50.00
-\$200.00	-\$200.00	-\$200.00	-\$200.00	-\$200.00	-\$200.00	-\$200.00
-\$300.00	-\$300.00	-\$300.00	-\$300.00	-\$300.00	-\$300.00	-\$300.00
\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
-\$10,387.50	-\$10,387.50	-\$10,387.50	-\$10,387.50	-\$10,387.50	-\$10,387.50	-\$9,002.50
-\$1,463.89	-\$1,463.89	-\$1,463.89	-\$1,463.89	-\$1,463.89	-\$1,463.89	-\$78.89
-\$21,958.37	-\$21,958.37	-\$21,958.37	-\$21,958.37	-\$21,958.37	-\$21,958.37	-\$1,183.37
\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
-\$21,958.37	-\$21,958.37	-\$21,958.37	-\$21,958.37	-\$21,958.37	-\$21,958.37	-\$1,183.37
\$438,661.63	\$416,703.26	\$394,744.88	\$372,786.51	\$350,828.14	\$328,869.76	\$327,686.39



	5 ^o					
42	43	44	45	46	47	48
130	100	100	100	100	100	80
\$23,400.00	\$18,000.00	\$18,000.00	\$18,000.00	\$18,000.00	\$18,000.00	\$14,400.00
-\$702.00	-\$540.00	-\$540.00	-\$540.00	-\$540.00	-\$540.00	-\$432.00
-\$2,498.74	-\$1,922.11	-\$1,922.11	-\$1,922.11	-\$1,922.11	-\$1,922.11	-\$1,537.69
-\$6,072.00	-\$6,072.00	-\$6,072.00	-\$6,072.00	-\$6,072.00	-\$6,072.00	-\$6,072.00
-\$7,761.23	-\$7,761.23	-\$7,761.23	-\$7,761.23	-\$7,761.23	-\$7,761.23	-\$7,761.23
-\$50.00	-\$50.00	-\$50.00	-\$50.00	-\$50.00	-\$50.00	-\$50.00
-\$200.00	-\$200.00	-\$200.00	-\$200.00	-\$200.00	-\$200.00	-\$200.00
-\$300.00	-\$300.00	-\$300.00	-\$300.00	-\$300.00	-\$300.00	-\$300.00
\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
\$0.00	-\$100.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
-\$6,925.00	-\$6,925.00	-\$6,925.00	-\$6,925.00	-\$6,925.00	-\$5,540.00	-\$5,540.00
-\$1,108.97	-\$5,870.34	-\$5,770.34	-\$5,770.34	-\$5,770.34	-\$4,385.34	-\$7,492.92
-\$16,634.55	-\$88,055.07	-\$86,555.07	-\$86,555.07	-\$86,555.07	-\$65,780.07	-\$112,393.75
\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
-\$16,634.55	-\$88,055.07	-\$86,555.07	-\$86,555.07	-\$86,555.07	-\$65,780.07	-\$112,393.75
\$311,051.84	\$222,996.77	\$136,441.70	\$49,886.64	-\$36,668.43	-\$102,448.50	-\$214,842.24

año					
49	50	51	52	53	54
80	60	60	30	30	15
\$14,400.00	\$10,800.00	\$10,800.00	\$5,400.00	\$5,400.00	\$2,700.00
-\$432.00	-\$324.00	-\$324.00	-\$162.00	-\$162.00	-\$81.00
-\$1,537.69	-\$1,153.26	-\$1,153.26	-\$576.63	-\$576.63	-\$288.32
-\$6,072.00	-\$6,072.00	-\$6,072.00	-\$6,072.00	-\$6,072.00	-\$6,072.00
-\$7,761.23	-\$7,761.23	-\$7,761.23	-\$7,761.23	-\$7,761.23	-\$7,761.23
-\$50.00	-\$50.00	-\$50.00	-\$50.00	-\$50.00	-\$50.00
-\$200.00	-\$200.00	-\$200.00	-\$200.00	-\$200.00	-\$200.00
-\$300.00	-\$300.00	-\$300.00	-\$300.00	-\$300.00	-\$300.00
\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
-\$4,155.00	-\$4,155.00	-\$2,077.50	-\$2,077.50	-\$1,038.75	\$0.00
-\$6,107.92	-\$9,215.49	-\$7,137.99	-\$11,799.36	-\$10,760.61	-\$12,052.55
-\$91,618.75	-\$138,232.42	-\$107,069.92	-\$176,990.44	-\$161,409.19	-\$180,788.20
\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
-\$91,618.75	-\$138,232.42	-\$107,069.92	-\$176,990.44	-\$161,409.19	-\$180,788.20
-\$306,460.99	-\$444,693.41	-\$551,763.33	-\$728,753.77	-\$890,162.96	-\$1,070,951.16

Anexo técnico

En esta sección se detallará el desarrollo de la función transferencia del circuito de la figura 47 que se vuelve a presentar a continuación para facilitar la lectura y entendimiento.

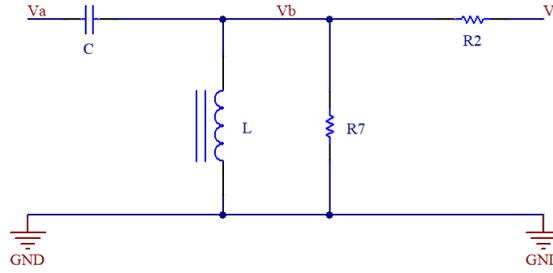


Figura 75: Circuito pasa altos RLC de segundo orden.

La función transferencia entre el nodo V_b y el nodo V_a está dada por el siguiente divisor de impedancias, donde Z_{RL} es el paralelo entre el resistor R_7 y el inductor L .

$$H(s) = \frac{Z_{RL}}{Z_{RL} + \frac{1}{sC}} = \frac{Z_{RL} \cdot sC}{Z_{RL} \cdot sC + 1} \quad (42)$$

Siendo Z_{RL} es siguiente:

$$Z_{RL} = \frac{R_7 \cdot sL}{R_7 + sL} \quad (43)$$

Ahora reemplazando la ecuación 43 en 42 se obtiene:

$$H(s) = \frac{\left(\frac{R_7 \cdot sL}{R_7 + sL}\right) \cdot sC}{\left(\frac{R_7 \cdot sL}{R_7 + sL}\right) \cdot sC + 1} \quad (44)$$

$$H(s) = \frac{(R_7 \cdot sL) \cdot sC}{(R_7 \cdot sL) \cdot sC + (R_7 + sL)} \quad (45)$$

$$H(s) = \frac{s^2 \cdot LCR_7}{s^2 \cdot LCR_7 + sL + R_7} \quad (46)$$

$$H(s) = \frac{s^2 \cdot LC}{s^2 \cdot LC + s\frac{L}{R_7} + 1} \quad (47)$$

Esta es la función transferencia del filtro pasa altos.

Dada la transferencia pasa altos hallada anteriormente (ecuación 47) y las siguientes relaciones entre entradas y salida para el modelo simplificado del Wah Wah en base a amplificadores operacionales, se puede hallar su transferencia total siguiendo los pasos que a continuación se detallan.

$$V_{out} = V_{in} + V_b \quad (48)$$

De la ecuación 11 se explicita el valor de V_b , siendo $H(s)$ la transferencia pasa altos de la ecuación 47.

$$V_b = -k \cdot V_{out} \cdot H(s) \quad (49)$$

$$V_b = -k \cdot V_{out} \cdot \left(\frac{s^2 \cdot LC}{s^2 \cdot LC + s \frac{L}{R_7} + 1} \right) \quad (50)$$

Luego reemplazando la última expresión en 48, se llega a:

$$V_{out} = V_{in} - k \cdot V_{out} \cdot \left(\frac{s^2 \cdot LC}{s^2 \cdot LC + s \frac{L}{R_7} + 1} \right) \quad (51)$$

Despejando V_{out} se obtiene:

$$V_{out} \cdot \left(1 + k \cdot \left(\frac{s^2 \cdot LC}{s^2 \cdot LC + s \frac{L}{R_7} + 1} \right) \right) = V_{in} \quad (52)$$

Haciendo denominador común del término entre paréntesis se obtiene lo siguiente:

$$V_{out} \cdot \left(\frac{s^2 \cdot LC + s \frac{L}{R_7} + 1 + k \cdot s^2 \cdot LC}{s^2 \cdot LC + s \frac{L}{R_7} + 1} \right) = V_{in} \quad (53)$$

Reacomodando el numerador se llega a:

$$V_{out} \cdot \left(\frac{s^2 \cdot LC \cdot (1 + k) + s \frac{L}{R_7} + 1}{s^2 \cdot LC + s \frac{L}{R_7} + 1} \right) = V_{in} \quad (54)$$

Y finalmente despejando para el cociente $\frac{V_{out}}{V_{in}}$ se obtiene la función transferencia:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{s^2 \cdot LC + s \frac{L}{R_7} + 1}{s^2 \cdot LC \cdot (1 + k) + s \frac{L}{R_7} + 1} \quad (55)$$

La ecuación 55 puede ser expresada en la forma normalizada de acuerdo a las siguientes definiciones.

$$H(s) = G \cdot \frac{\left(\frac{s}{\omega_z} \right)^2 + \frac{s}{\omega_z Q_z} + 1}{\left(\frac{s}{\omega_p} \right)^2 + \frac{s}{\omega_p Q_p} + 1} \quad (56)$$

Donde las singularidades deben cumplir lo siguiente:

$$\omega_z^2 \triangleq \frac{1}{LC} \Rightarrow \omega_z = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (57)$$

$$\omega_z \cdot Q_z \triangleq \frac{R_7}{L} \Rightarrow Q_z = \frac{R_7}{L \cdot \omega_z} = R_7 \cdot \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (58)$$

$$\omega_p^2 \triangleq \frac{1}{LC \cdot (1 + k)} \Rightarrow \omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC \cdot (1 + k)}} \quad (59)$$

$$\omega_p \cdot Q_p \triangleq \frac{R_7}{L} \Rightarrow Q_p = \frac{R_7}{L \cdot \omega_p} = R_7 \cdot \sqrt{\frac{C \cdot (1 + k)}{L}} \quad (60)$$

Bibliografía

Referencias

- [1] Página WEB - Pedales Wah Wah Morley - <http://www.morleypedals.com>
- [2] Página WEB - Pedal Wah Wah Fulltone - <http://www.fulltone.com>
- [3] Página WEB - Pedal Wah Wah Vox - <http://www.voxamps.com>
- [4] Página WEB - Pedales Wah Wah Cry Baby - <http://www.jimdunlop.com>
- [5] Página WEB - Twin T Bandpass filter
- [6] Paper - G. S. Moschytz - "A general approach to Twin-T design and its application to hybrid integrated linear active networks" - Agosto 1970
- [7] Paper - G. Hilber, A. Burgstaller , E. H. Stitz , A. Rauchenecker , T. Ostermann , J. Gila y M. Schiefer - "Stability analysis and design methodology for an Åkerberg-Mossberg filter" - Junio 2014
- [8] Application Note - R.G. Keen - "The Technology of Wah Pedals" - Septiembre 1999
- [9] Application Note - R.G. Keen - "Human Voices and the Wah Pedal" - 1999
- [10] Application Note - Analog Devices - "Decoupling Techniques" - 2009
- [11] Artículo - Enciclopedia Británica - "Frequency just noticeable difference" - 2016