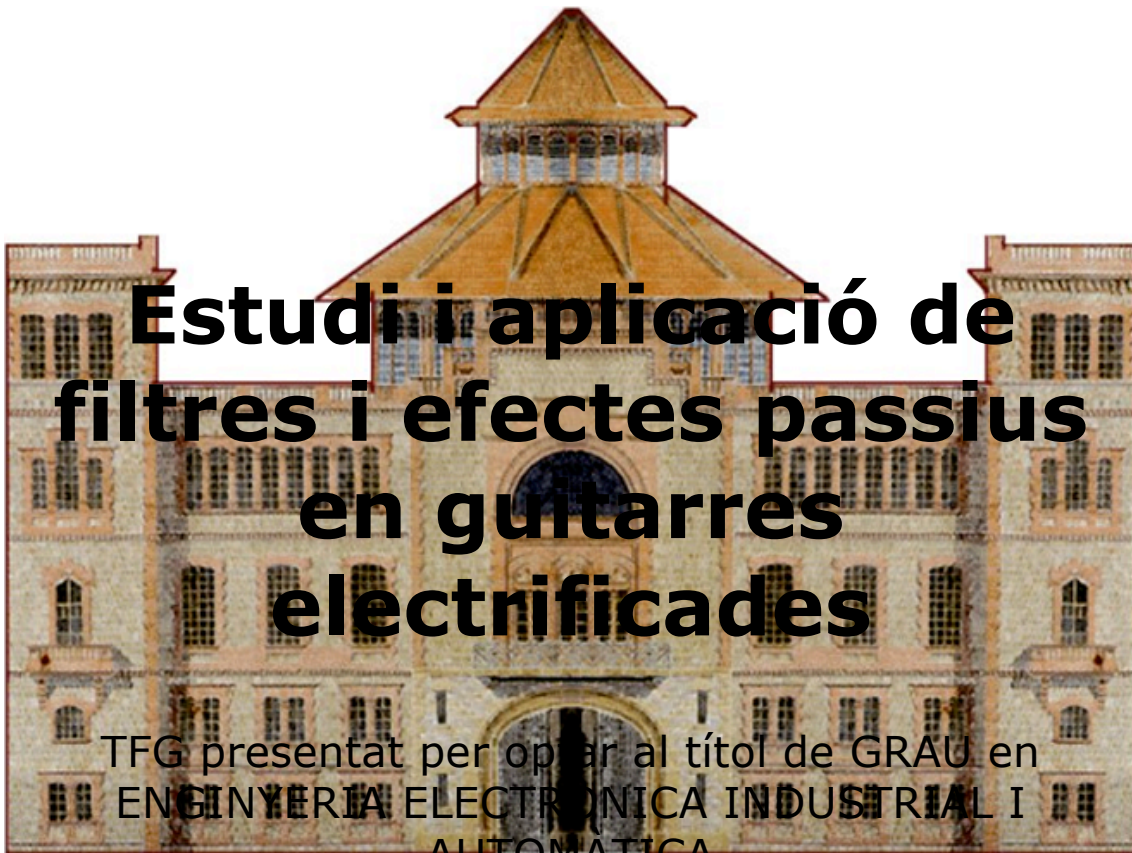




Escola Universitària d'Enginyeria
Tècnica Industrial de Barcelona
Consorci Escola Industrial de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Memòria



Estudi i aplicació de filtres i efectes passius en guitarres electrificades

TFG presentat per optar al títol de GRAU en
ENGINYERIA ELECTRÒNICA INDUSTRIAL I
AUTOMÀTICA

per **Rafel Manera Escalero**

Barcelona, 11 de juny de 2014

Director: Joan Domingo Peña
Departament d'Enginyeria de Sistemes, Automàtica i Informàtica
Industrial (ESAI)
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

ÍNDIX MEMÒRIA

Índex memòria	1
Resum	3
Resumen	3
Abstract.....	3
Agraïments.....	5
Capítol 1: Història de la guitarra elèctrica.....	7
1.1. Els Orígens.....	7
1.2. Les Paul i Leo Fender.....	9
Capítol 2: El <i>pickup</i> magnètic.....	11
2.1. Resposta freqüencial.....	12
2.2. Càrrega	13
2.3. La posició del <i>pickup</i>	15
2.4. Tipus de <i>pickups</i>	19
2.5. La posició dels imants	22
Capítol 3: Estat de l'art de l'electrònica de la guitarra elèctrica	24
3.1. <i>Fender Telecaster</i>	27
3.2. <i>Fender Mustang</i>	27
3.3. <i>Fender Jazz Bass</i>	28
3.4. <i>Fender Stratocaster</i>	29
3.5. <i>Brian May Red Special</i>	30
3.6. <i>Gibson Les Paul</i>	31
Capítol 4: Disseny del prototip.....	32
4.1. La guitarra d'aquest projecte	32
4.1.1. Els pickups.....	33
4.2. Modificacions realitzades	34
4.2.1. Combinació de pickups.....	34
4.2.2. Compressor.....	51
4.2.3. Distorsió	53
4.2.4. Condensadors.....	56
4.2.5. Filtres rebutja-banda. Varitone.....	58
4.2.6. Control de to	59

4.2.7. Resistències	61
4.3. Altres modificacions possibles	62
4.3.1. Equalització	62
4.3.2. Control de to de tres bandes. Tone Stack	63
4.3.3. Grease Bucket	67
4.3.4. Treblebleed	68
Capítol 5: Realització del prototip	70
5.1. Procés de mecanització	70
5.2. El prototip finalitzat	73
Capítol 6: Bibliografia	74
6.1. Bibliografia de Consulta.....	74
6.1.1. Llibres	74
6.1.2. Articles	74
6.1.3. Webs.....	74

RESUM

Aquest projecte consisteix en l'estudi i aplicació dels diferents filtres i efectes electrònics aplicables a una guitarra elèctrica. Les guitarres elèctriques estan dotades de circuits passius, per això tot el disseny és realitzat a base d'electrònica passiva. Finalment, es realitza un prototip sobre el cos d'una guitarra elèctrica.

RESUMEN

Este proyecto consiste en el estudio i aplicación de diferentes filtros i efectos electrónicos aplicables a una guitarra eléctrica. Las guitarras eléctricas están dotadas de circuitos pasivos, es por eso que todo el diseño se ha realizado a base de electrónica pasiva. Finalmente, se realiza un prototipo sobre el cuerpo de una guitarra eléctrica.

ABSTRACT

This project is focused in the study and application of different electronic filters and effects that can be applied on an electric guitar. Electric guitars consist of passive circuits, thus the design has been made based on passive electronics. Finally, a prototype has been made on the body of an electric guitar.

AGRAÏMENTS

Vull donar les gràcies a Joan Domingo per disposar d'una proposta de Treball de Fi de Grau que em resultés tan interessant.

També vull agrair el suport que he rebut per part de la meva família, tant en forma d'ànims, com econòmic i a l'hora de realitzar el prototip.

CAPÍTOL 1: HISTÒRIA DE LA GUITARRA ELÈCTRICA

1.1. Els Orígens

L'origen de la guitarra elèctrica el podem trobar als Estats Units d'Amèrica durant la dècada de 1920. En aquells anys es feren molt populars les orquestres de jazz, que tenien seccions de vents (trompetes i trombons) i bateries. Degut a aquestes noves orquestres, els guitarristes quedaven en segon pla, ja que els altres instruments sonaven molt més fort que ells. Era necessari un volum molt més elevat per a la guitarra. La primera innovació al respecte va ser incorporar un ressonador metàl·lic a les guitarres de l'època que aconseguia un volum un poc superior, però no era suficient.

Durant aquella època, es començaven a donar a conèixer els gramòfons amb amplificació elèctrica. Els resultats aconseguits amb l'electrònica que incorporaven aquests aparells fou bastant satisfactòria, així que no es va tardar en començar a experimentar amb l'aplicació d'aquest principi a les guitarres. *Lloyd Loar*, un músic, enginyer de so i luthier que treballava per la marca *Gibson*, es suposa que va ser el primer que va incorporar un *pickup* a una guitarra i la va connectar a un amplificador.

Lloyd Loar estava fascinat per la idea de l'amplificació elèctrica, i el 1923 va inventar un *pickup* capacitiu electrostàtic. Aquest *pickup* no va ser molt útil, ja

que degut al seu principi de funcionament presentava una molt alta impedància de sortida i produïa fortes interferències.

Lester Polfuss també havia experimentat molt en aquest camp, més tard es tornaria molt famós sota el pseudònim *Les Paul*. La seva tècnica consistia en utilitzar el cristall piezoelèctric d'un gramòfon per recollir les vibracions de la part superior de la guitarra i utilitzar una ràdio per amplificar-les. Altres van provar d'introduir micròfons dins el cos de la guitarra, però a part de capturar el so de la guitarra, també capturaven el so de l'aire que es movia dins el cos de la guitarra, cosa que resultava en una realimentació acústica (comunament conegut com "acoblament"). Una molt important millora posterior va ser la invenció d'un *pickup* que fos sensible a la vibració de les cordes, però no al soroll exterior de la guitarra i a les vibracions de la resta del cos de la guitarra. Aquests dispositius consistien en elements magnètics i bobines.

Degut al creixent interès en les guitarres durant els anys 20, alguns músics van començar a produir-les ells mateixos. Els grans avantguardistes en aquest camp van ser *George Beauchamps* i *Paul Barth*. Els seus experiments no van tardar en portar-los a la revolucionària conclusió de que, si s'utilitzava amplificació electrònica, no era necessari un cos buit ressonador. Per aconseguir un to que es mantingués el màxim temps possible (*sustain*), van construir el mànec i el cos de la guitarra en una sola peça d'alumini en un motlle. *Adolph Rickenbacher* fou l'encarregat de construir aquesta guitarra.

Aquest model, anomenat "Rickenbacker A22" o "A25", depenent de l'escala (22 o 25 polzades), fou molt popular i es va comercialitzar fins la dècada de 1950. El *pickup* que incorporava aquesta guitarra consistia en dos imants amb forma de ferradura de cavall i una bobina. Però les guitarres d'alumini tenien un greu problema, amb la calor que produïen els llums d'escenari es desafinaven de manera considerable. A partir de 1935, *Rickenbacker* va introduir un material alternatiu: la baquelita, que sorprenentment, va proporcionar unes característiques sonores d'alta qualitat.

Durant la segona guerra mundial, quasi tots els fabricants van interrompre la producció de guitarres. Tot i així, després de la guerra la producció es va disparar, *Gibson* va desenvolupar molt models nous.

Després de la segona guerra mundial, a Alemanya, el jazz, que va ser prohibit pels nazis degut a que es va considerar una forma "degenerada" de música, es va tornar molt popular. Això va fer que la demanda de guitarres elèctriques augmentés, i molts fabricants de guitarres espanyoles i violins van començar a fabricar guitarres elèctriques.

1.2. Les Paul i Leo Fender

Dels diferents models de guitarres elèctriques, les de cos sòlid són les més utilitzades. Un dels que més va apostar per aquest tipus de construcció de guitarres va ser l'anteriorment anomenat *Les Paul*, qui hi va experimentar amb molt entusiasme. *Les Paul* no va veure cap importància en la ressonància del cos de la guitarra, el seu objectiu era aconseguir que la vibració de les cordes es mantingués el màxim de temps possible. Per aconseguir-ho fins i tot va posar cordes a un tros de via de tren.

Tot i que els diferents sons que aconseguia *Les Paul* eren més o menys per sort, va descobrir que diferents característiques tonals s'aconseguien amb diferent nombre de voltes a la bobina del *pickup*, i que la posició d'aquest *pickup* marcava una gran diferència. El 1941 va construir una guitarra a partir d'un bloc massís de fusta com a nucli, on hi va muntar dos *pickups* (possiblement el primer a muntar-ne dos), a cada banda del bloc massís hi va afegir les cavitats buides d'una altra guitarra. Des de fora, s'assemblava a una guitarra clàssica de cos buit. A aquesta guitarra la va anomenar "*The Log*". Des de 1941 a 1947 va acudir a *Gibson* intentant convèncer a la marca de que fabriqués els seus dissenys de guitarres cos sòlid, encara que el van rebutjar bruscament.

L'home que va ajudar més a l'avanç de la guitarra de cos sòlid va ser *Leo Fender*. Des de molt jove va estar interessat per l'electrònica, amb els inicis de la ràdio. Degut al gran problema que presentaven les guitarres de cos buit electrificades, que al pujar el volum de l'amplificador es presentava realimentació acústica, *Leo Fender* va desenvolupar la seva primera guitarra de cos sòlid el 1943, tot i que va quedar tan sols com un prototip. Després de la segona guerra mundial va augmentar la producció de guitarres hawaianes, que eren guitares per ser tocadetes horitzontalment a sobre els genolls. Tot i que *Leo Fender* no sabia tocar la guitarra, tenia una molt bona oïda per als sons de qualitat, i amb això va aconseguir molts contactes a la ciutat de Los Angeles. Els instruments i amplificadors fabricats per *Fender* van tenir molt èxit degut al seu espectacular so, que no es coneixia fins al moment. Eren molt robustos i resistien els transports cap a molts concerts sense fer-se malbé. Presentaven una resposta freqüencial que potenciava els aguts i els greu i atenuava la zona de mitjos, cosa que va triomfar entre els músics de *country* i *western*. L'era del *Rock & Roll* encara no havia començat.

Durant l'any 1950, *Leo Fender* va tornar a insistir en la idea de la guitarra de cos sòlid per a una posició vertical. Va desenvolupar dos models, la "*Esquire*" amb un *pickup*, i la "*Broadcaster*" amb dos *pickups*. El darrer model no va poder mantenir el seu perquè una bateria de la marca *Gretsch* ja portava aquest mateix nom abans. Així que va ser anomenat posteriorment com a "*Telecaster*".

L'any 1954 *Fender* va introduir al mercat un producte millorat amb el nom de "*Stratocaster*". Incorporava tres *pickups* i tenia una forma molt més ergonòmica

que el model "Telecaster". Quan va començar a tocar-se el *Rock & Roll* va ser acceptada entusiàsticament pels guitarristes i es va consolidar com el so que identificava aquella època. Finalment, es va convertir en la guitarra elèctrica de més èxit de la història.



Figura 1. Fender Telecaster.

Font: <http://www.thomann.de/thumb/bdbmagic/pics/prod/310825.jpg>



Figura 2. Fender Stratocaster.

Font: <http://www.thomann.de/thumb/bdbmagic/pics/prod/283185.jpg>

L'any 1965 la companyia *Fender* va ser venuda a la *CBS (Columbia Broadcasting Service)*. Es va produir una reestructuració de la companyia, cosa que va generar la creença entre els músics que la qualitat dels productes havia disminuït considerablement.

Durant les dècades de 1970 i 1980 *Fender* va començar a fabricar diferents variants dels model *Stratocaster* i *Telecaster*. Aquestes variacions conservaven la forma del cos de la guitarra, però canvien petits detalls tècnics. Avui en dia encara es pot trobar una gran varietat de sèries del mateix model de guitarra a la venda. El 1985, la fàbrica es va separar del grup televisiu *CBS* per tornar a ser una empresa independent.

CAPÍTOL 2:

EL *PICKUP* MAGNÈTIC

El *pickup* magnètic és el dispositiu més utilitzat per capturar les vibracions de les cordes d'una guitarra elèctrica, per després ser amplificades. Es tracta d'un dispositiu que no ha evolucionat gaire des de la seva invenció.

Està constituït per un imant permanent i una bobina de coure al seu voltant. El seu principi de funcionament és molt senzill. L'imat crea un camp magnètic constant, dins aquest camp magnètic s'hi troben les cordes de la guitarra, quan aquestes es troben en repòs, la tensió que es presenta entre els extrems de la bobina és nul·la. Degut a que les cordes de la guitarra elèctrica estan fabricades a partir de materials ferromagnètics, en el moment en que aquestes vibren produeixen una alteració del camp magnètic produït per l'imat. L'alteració del camp magnètic constant de l'imat fa que es converteixi en camp magnètic altern, i aquest camp magnètic altern indueix un corrent elèctric altern proporcional a través de la bobina de fil de coure. Aquest corrent altern induït a la bobina és proporcional al moviment oscil·latori de les cordes i és el que serà amplificat. L'amplitud del voltatge que pot ser observat als extrems de la bobina és proporcional al nombre d'espores del bobinat i al canvi temporal del flux magnètic que travessa la bobina. L'amplitud també depèn de la força magnètica produïda per l'imat, de la secció de la corda, de la permeabilitat magnètica que presenti el material de la corda i de la distància entre la corda i el pol de l'imat. El *pickup* reacciona sobretot al moviment perpendicular al pla de la guitarra i de manera molt subtil al moviment paral·lel.

El voltatge que genera un *pickup* pot variar molt depenent del tipus, model o fabricant. La majoria de les vegades es tracta d'un centenar de mV, tot i que es poden arribar a trobar alguns que presentin voltatges de més d'1 V.

2.1. Resposta freqüencial

El *pickup* magnètic presenta una resposta freqüencial determinada. Al tractar-se d'un bobinat de fil de coure, no només presenta comportament inductiu. A part de la inductància, degut a la longitud del coure es presenta una resistència òhmica. També es produeix una capacitat paràsita entre les espires del bobinat. Amb aquests tres components es pot formar el primer model elèctric de *pickup* magnètic.

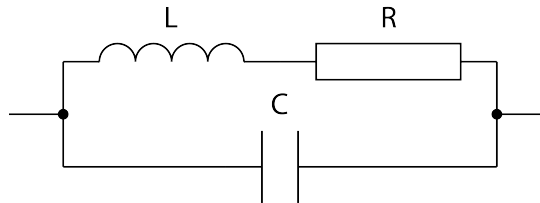


Figura 3. Model elèctric d'un pickup magnètic.

Per tal de completar aquest model s'hauria d'afegir un generador sinusoidal que simuli el comportament de les cordes. La combinació del generador amb els components passius anteriorment anomenats produeix un filtre passa-baixos de segon ordre.

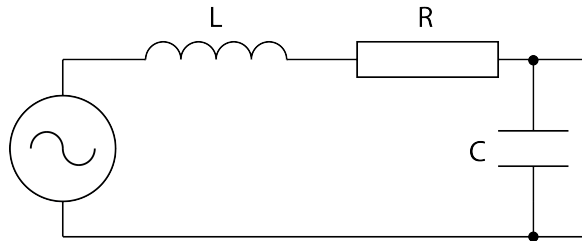


Figura 4. Model elèctric d'un pickup magnètic tenint en compte l'acció de les cordes.

$$H(s) = \frac{\frac{1}{sC}}{sL + R + \frac{1}{sC}} = \frac{1}{LCs^2 + RCs + 1} \quad (1)$$

La freqüència de tall d'aquest filtre passa-baixos ve donada per l'equació (1).

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2)$$

El filtre de segon ordre que resulta de l'estudi del comportament freqüencial del *pickup* presenta una característica molt important: un pic de ressonància. Aquest pic de ressonància juga un paper molt important en el tipus de so que produirà la guitarra elèctrica. La freqüència a la qual es produeix el pic de ressonància és una mica inferior a la de tall del filtre. El que s'allunyi de la freqüència de tall

dependrà del factor de qualitat Q que presenti aquest filtre, si el factor de qualitat del filtre fos infinit, les freqüència de ressonància coincidiria amb la freqüència de tall del filtre.

Com es pot observar, el *pickup* d'una guitarra elèctrica és de tot menys un transductor d'alta fidelitat com podria ser un micròfon d'estudi.

2.2. Càrrega

La càrrega externa que s'apliqui al *pickup* de la guitarra també juga un paper fonamental en el resultat final. Al no tractar-se d'un generador ideal, la càrrega té influència sobre la resposta freqüencial d'un *pickup*.

Si s'analitzen les possibles càrregues que es solen aplicar a un *pickup*, el primer que es pot observar són els potenciòmetres inclosos en el cos de la guitarra. Normalment es tracta d'un potenciòmetre de volum i un de tò. Més endavant es trobaria la impedància d'entrada de l'amplificador al qual es connectés la guitarra. Una altra càrrega que sol passar-se per alt és la capacitat del cable que connecta la guitarra amb l'amplificador (cable coaxial), que per una distància mitjana, sol rondar el centenar de pF, valor que no és menyspreable degut al seu efecte sobre la resposta freqüencial.

Normalment, la càrrega aplicada al *pickup* d'una guitarra elèctrica està formada per una component resistiva i una capacitiva. Cada una d'aquestes components produeix un efecte diferent.

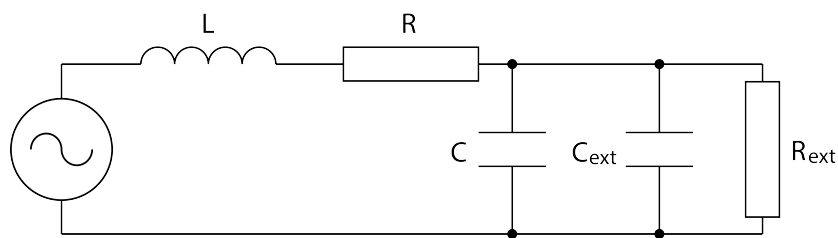


Figura 5. Model elèctric d'un pickup magnètic tenint en compte l'acció de les cordes i la càrrega.

$$H(s) = \frac{R_{ext}}{(C+C_{ext})LR_{ext}s^2 + (L+(C+C_{ext})RR_{ext})s + R + R_{ext}} \quad (3)$$

Per al cas de la càrrega resistiva, el que es produeix es una disminució del factor de qualitat del filtre passa-baixos de segon ordre que representa el *pickup*, el

que fa que l'alçada del pic de ressonància disminueixi. Com més baixa sigui la resistència de càrrega més es disminueix el factor de qualitat.

Molts amplificadors de guitarra clàssics tenen dues entrades diferents, aquestes dues entrades presenten impedàncies diferents. En el cas de l'entrada 1, la impedància d'entrada, es a dir, la càrrega que fa l'amplificador sobre la guitarra, és d'1 M Ω . En canvi per a l'entrada 2, la impedància d'entrada és tan sols de 136 k Ω . Connectar la guitarra a una entrada o una altra modificarà de forma significativa l'alçada del pic de ressonància del *pickup* de la guitarra.

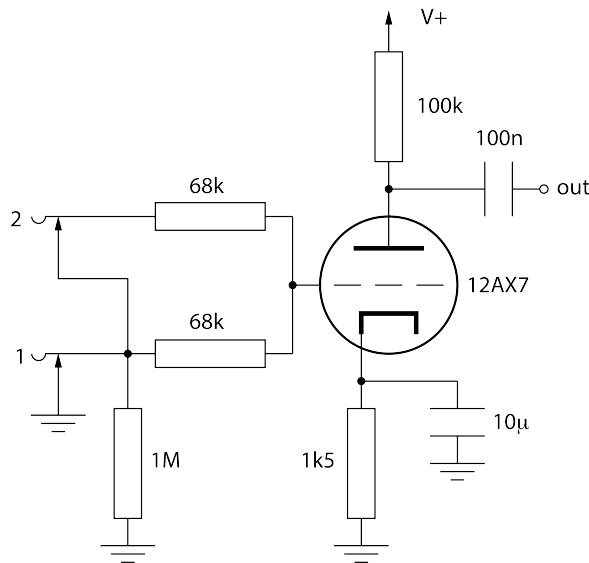


Figura 6. Etapa d'entrada de molts amplificadors de guitarra, dissenyada per Leo Fender.

En canvi per al cas de la càrrega capacitiva, el que es produeix és una disminució de la freqüència de ressonància. Com més alt sigui el valor de la càrrega capacitiva, més disminuirà el valor de la freqüència on es produeix el pic de ressonància. D'aquesta manera, la distància del cable que s'utilitza per connectar la guitarra a l'amplificador modifica de forma notable la freqüència a la qual es produeix la ressonància.

L'efecte de la capacitat paràsita del cable i de la impedància d'entrada es podrien suprimir implementant un adaptador d'impedància format per un amplificador operacional de tecnologia FET. Però aquest tipus de muntatge necessitaria d'alguna font d'alimentació dins el cos de la guitarra, cosa que surt de l'objectiu d'aquest treball.

2.3. La posició del *pickup*

Si s'observen les guitarres elèctriques que hi ha actualment al mercat, és fàcil veure que gairebé cap d'elles porta només un *pickup*. El més habitual és 2 o 3, tot i que es poden trobar alguns models amb 4 o 5 *pickups*. La raó per la qual les guitarres tenen més d'un *pickup* és que la sonoritat final de la guitarra canvia molt en funció de la posició on s'hagi col·locat el *pickup*. Si el *pickup* està situat més pròxim al mànec de la guitarra es produeix un so més suau amb més presència de greus, en canvi quan es situa més aprop del pont de la guitarra, el so resultant és més estrident, amb més atac i molta més presència d'harmònics aguts. La transició d'un extrem a l'altre és progressiu, així que un *pickup* situat en una posició entremig del pont i el mànec tindrà un so resultat entremig dels dos extrems anteriorment descrits. Degut també a que aquesta transició és contínua, com més *pickups* tingui una guitarra elèctrica més versatilitat i més sons diferents es podran obtenir.

Per entendre l'efecte que produeix col·locar un *pickup* en una posició o una altra, primer s'ha d'entendre com produeixen els sons les cordes de la guitarra, com vibren, perquè al final el *pickup* capta el moviment oscil·latori de la corda i el transforma en un senyal elèctric.

Quan un guitarrista pinça una corda de la guitarra el que es produeix a la corda són ones estacionàries. Ja que la corda no vibra a una sola freqüència, es produeixen harmònics. Aquests harmònics són múltiples enters (n vegades) de la freqüència fonamental de vibració de la corda. A la figura 7 es pot observar la vibració fonamental o primer harmònic ($n=1$) i els tres següents. Aquesta és una representació bidimensional, però tot això es produeix de manera tridimensional, ja que la corda vibra en totes direccions.

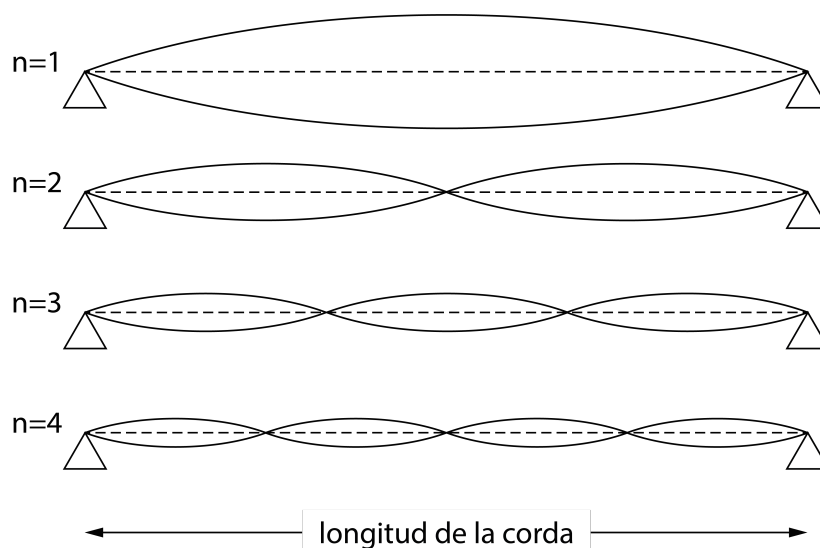


Figura 7. Ones estacionàries en una corda de guitarra.

En una ona estacionària és produeixen $n-1$ nodes al llarg de la longitud de la corda. Els nodes son punts de la corda on, per a un determinat harmònic, l'amplitud de la vibració és nul·la. Per contra, en una ona estacionària es produeixen n valls, que son punts on l'amplitud de la vibració és màxima.

A la taula 1 s'hi troben les freqüències fonamentals a les que vibren les cordes d'una guitarra afinada amb afinació estàndard.

Taula 1. Freqüències d'afinació estàndard per a guitarres.

Corda	Nota musical	Freqüència fonamental (Hz)
1	MI / E	329,6
2	SI / B	246,9
3	SOL / G	196,0
4	RE / D	146,8
5	LA / A	110,0
6	MI / E	82,4

Si el *pickup* està situat en el punt on es produeix un node en un harmònic concret, aquest harmònic no produirà cap variació del camp magnètic que travessa la bobina del *pickup* i, per tant, no es presentarà cap tensió als extrems de la bobina. Això implicarà que la freqüència de l'harmònic en qüestió desaparegui de l'espectre de freqüències resultant. De fet, no sols desapareixerà aquest harmònic, també desapareixeran els seus múltiples, ja que també presentaran un node a la posició del *pickup*.

Un exemple numèric:

Assumim una longitud de corda de 64 cm, observem particularment la cinquena corda, que produeix una freqüència de 110 Hz, i col·loquem un *pickup* a 16 cm d'un extrem de la corda, que és una quarta part de la longitud de la corda. Aleshores els harmònics $n=4$, $n=8$, $n=12$, etc. desapareixeran de l'espectre (440 Hz, 880 Hz, 1320 Hz, etc.), ja que tots ells presenten un node a 16 cm de l'extrem de la corda. Per contra, els harmònics $n=2$, $n=6$, $n=10$, etc. presenten una vall a la posició del *pickup* (220 Hz, 660 Hz, 1100 Hz, etc.), per tant, presentaran el màxim volum a l'espectre resultant. Per altra banda, els altres harmònics, els senars, els quals a la posició del *pickup* presenten el punt mig longitudinal (no d'amplitud) entre un node i una vall, seran atenuats -3 dB.

A priori, el que pareix més lògic és col·locar el *pickup* just al punt mig entre els dos extrems de la corda, on l'amplitud del primer harmònic (fonamental) és màxima. Però si es fa el mateix càlcul que s'ha fet anteriorment, s'observa com tots els harmònics parells serien suprimits de l'espectre. En conseqüència, l'espectre de freqüències estaria compost només per harmònics senars. I una successió d'harmònics senars resulta en una ona quadrada. Aquest seria el cas extrem d'aquest efecte de supressió d'harmònics.

Tot això resulta en una distorsió de l'espectre que produeix la corda, ja que no totes les freqüències són transferides en igual magnitud. Per tant, el senyal que s'obté a la sortida del *pickup* no es correspon directament amb la vibració de la corda. Aquest efecte de supressió o atenuació d'harmònics és inevitable amb el principi del *pickup* magnètic.

En els exemples anteriors s'ha considerat una longitud de corda fixa, però quan un guitarrista toca la guitarra, la longitud de la corda va variant en funció de a quina posició del màstil pinça la corda amb els dits de la mà esquerra. Però el *pickup* sempre es troba a la mateixa posició. Així, per cada longitud de corda possible que presenta el màstil d'una guitarra (entre 20 i 24), es produeix un espectre diferent.

D'això es pot deduir que com més petita sigui la distància des de l'extrem de la corda a la posició del *pickup*, menys freqüències seran suprimides completament de l'espectre.

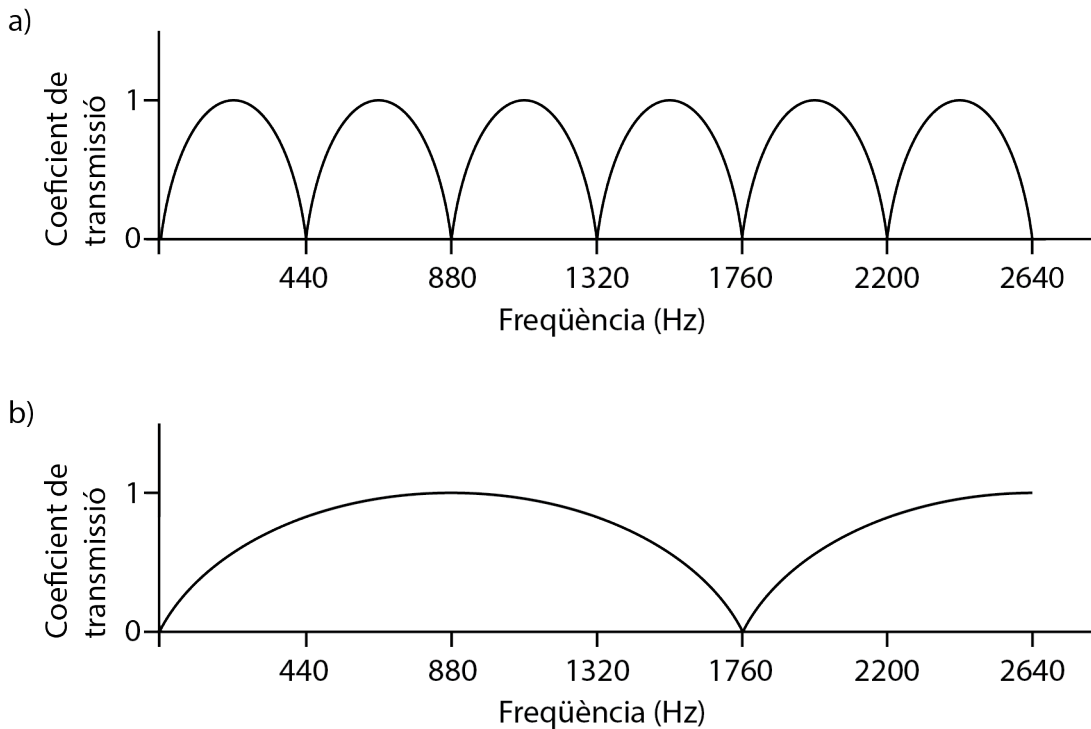


Figura 8. a) Resposta freqüencial a 16 cm. b) Resposta freqüencial a 4 cm.

A la figura 8 es pot observar la diferència entre la resposta freqüencial pel que fa a la posició del *pickup* a dues longituds de l'extrem de la corda. A la figura 8 a) hi ha representada la resposta freqüencial per a la cinquena corda (110 Hz) d'un *pickup* col·locat a un quart de la longitud total de la corda (16 cm). En canvi a la figura 8 b) hi ha representada la resposta freqüencial per a la cinquena corda d'un *pickup* col·locat a una setzena part de la longitud total de la corda (4 cm).

En el cas d'una distància molt petita, com la de la figura 8 b), es pot observar com la freqüència fonamental de la corda i els primer harmònics són atenuats atenuats considerablement en comparació amb els harmònics més aguts. Això produeix un so més dur, estrident i amb menys volum.

Un altre mètode per realitzar una adaptació tonal és el de col·locar un *pickup* amb un angle d'inclinació tal que la vibració de la sisena corda (la més greu) és capturada a una distància superior del pont que la primera corda (la més aguda). D'aquesta manera, s'aconsegueix que les cordes més agudes produeixin un so més nítid i amb més aguts, i per altra banda, que les cordes més greus, produeixin un so més suau i menys cridaner. El model "ES300" de *Gibson* va ser el primer que va incorporar aquest principi. A la figura 9 es pot observar l'anomenat model, concretament un dels primers, en el qual el *pickup* ocupava gairebé tot l'espai entre el màstil i el pont. Aquesta disposició va demostrar no ser gaire còmode per tocar l'instrument, i per tant, va ser substituïda per l'estàndard actual que tan sols està lleugerament inclinat i prop del pont.



Figura 9. Gibson "ES300".

Font: http://cdn1.gbase.com/usercontent/gear/2689311/p2_u4sup31cz_so.jpg

De la variació de la sonoritat d'una guitarra elèctrica respecte a la posició on es col·loca el *pickup* es pot deduir que l'ideal seria poder variar la posició d'aquest *pickup* directament sobre l'instrument pel propi músic. DeArmond, un dels més antics productors de *pickups* va desenvolupar el model "1000" per a guitarres de jazz, que es podia desplaçar i col·locar en qualsevol punt entre el màstil i el pont mitjançant un rail metàl·lic.



Figura 10. DeArmond "1000".

Font: http://www.classicrockguitars.nl/media/catalog/product/cache/1/image/265x265/17f82f742ffe127f42dca9de82fb58b1/2/_/2_2_1.jpg

2.4. Tipus de *pickups*

Els *pickups* que podem trobar en el mercat es poden distribuir en dos grups: simples i dobles. Els *pickups* simples solen ser anomenats com a *single coil* (bobina simple) i els *pickups* dobles normalment s'anomenen *humbuckers* (contrari al *hum*).

Un *pickup single coil* consisteix en un sol bobinat i un o varis imants que produeixen un camp magnètic permanent, la direcció del qual és perpendicular a l'àrea del bobinat i sempre té el mateix sentit.



Figura 11. Pickup single coil.

Font: <http://www.americanmusical.com/ItemImages/Large/p2448.jpg>

A la figura 11 es pot observar un *pickup* de tipus simple, té un sol bobinat que envolta 6 imants cilíndrics. Aquesta és la forma més senzilla de *pickup* que es pot trobar en el mercat actualment.

Un *pickup* simple és molt sensible a les interferències electromagnètiques, és molt fàcil que s'hi indueixi un corrent provinent de camps magnètics que envolten la guitarra en el moment en que s'està tocant. Per això es va desenvolupar el *pickup* doble o *humbucker*, que en anglès vol dir que s'oposa al *hum*, que és com s'anomena al soroll induït pel camp magnètic produït per la xarxa elèctrica (50 o 60 Hz).

Els *pickups humbucker* consisteixen en dos bobinats. La diferència entre els dos bobinats és que estan realitzats en sentit contrari un respecte de l'altre. Els camps magnètics que travessen cada un dels bobinats també ho fan en sentit oposat un de l'altre.

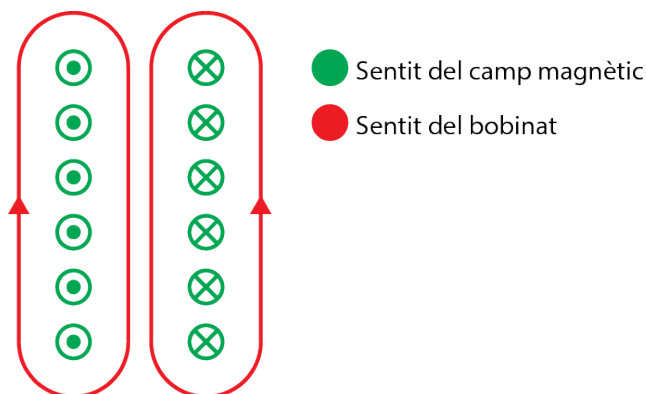


Figura 12. Sentit del bobinat i camp magnètic en un pickup humbucker.

A la figura 12 s'il·lustra el que s'ha explicat anteriorment, el sentit del bobinat i del camp magnètic són oposats un respecte de l'altre. Amb això el que s'aconsegueix és que els senyals als extrems de cada una de les bobines produïts per la vibració de les cordes presenten la mateixa fase a cada un dels bobinats, en canvi, els senyals produïts per interferències electromagnètiques presenten fases oposades. Perquè les cordes induïxin un corrent a través de la bobina del *pickup* és necessari que aquestes es trobin dins els mateix camp magnètic que travessa el bobinat. En canvi, les interferències electromagnètiques no necessiten del camp magnètic permanent que produeixen els imants dels *pickups*, per tal d'induir un corrent a través de la bobina. Per tant, invertint tant el sentit del bobinat com el del camp magnètic permanent dels imants, s'aconsegueix que la fase del senyal produït per les cordes sigui la mateixa als dos *pickups*, però el soroll estigui desfasat 180° entre els dos *pickups*.

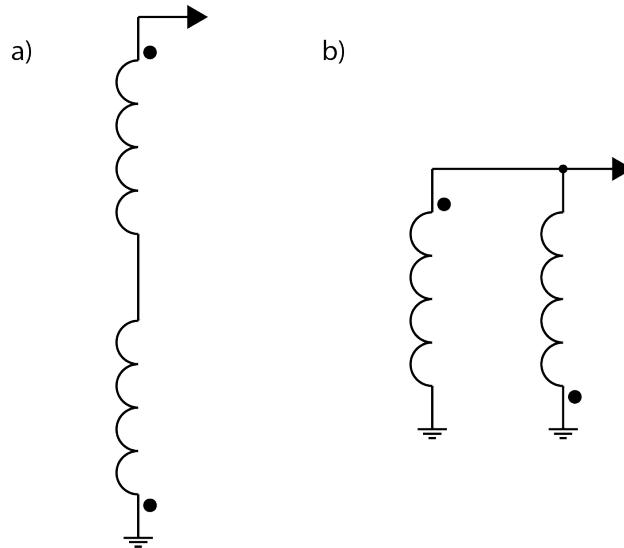


Figura 13. a) Connexió en sèrie. b) Connexió en paral·lel.

Sempre que els dos *pickups* que formen un *humbucker* es connectin com es mostra a la figura 13, es produirà una eliminació del soroll provinent de interferències electromagnètiques. A la figura 13, el punt indica el principi del bobinat de cada un dels *pickups*. L'eliminació del soroll es produeix perquè es sumen aritmèticament els dos senyals de cada un dels *pickups*, així els senyals que corresponen amb la vibració de les cordes seran sumats (ja que es troben en fase) i els que corresponen a soroll seran restats (ja que es troben en contrafase). Com que les interferències electromagnètiques afecten gairebé igual als dos *pickups*, els senyals induïts per aquestes tindran una magnitud pràcticament igual als dos *pickups*, però amb signe contrari; cosa que farà que quedin suprimits del senyal resultant.

La forma més habitual de connectar un *pickup humbucker* és en sèrie, com està representat a la figura 13 a). Connectant en sèrie s'aconsegueix que les tensions produïdes per la vibració de les cordes es sumin i així aconseguir major volum i una relació senyal soroll més alta.



Figura 14. Diferents models comercials de humbuckers.

Font: <http://www.guitarexcellence.co.za/blog/wp-content/uploads/2010/11/Guitar-Lessons-Guitar-Excellence-Humbucker-Pickups.jpg>

A la figura 14 es poden observar diferents models de *humbuckers*.

2.5. La posició dels imants

Un altre fet que influeix en el so d'un *pickup* és la posició dels imants permanents (en el cas que en presenti més d'un) respecte de les cordes de la guitarra. És molt típic que un *pickup* presenti un imant o barra metàl·lica per cada una de les cordes. La distància de l'imant a la corda determina si la corda està envoltada per un camp magnètic més fort o més feble.

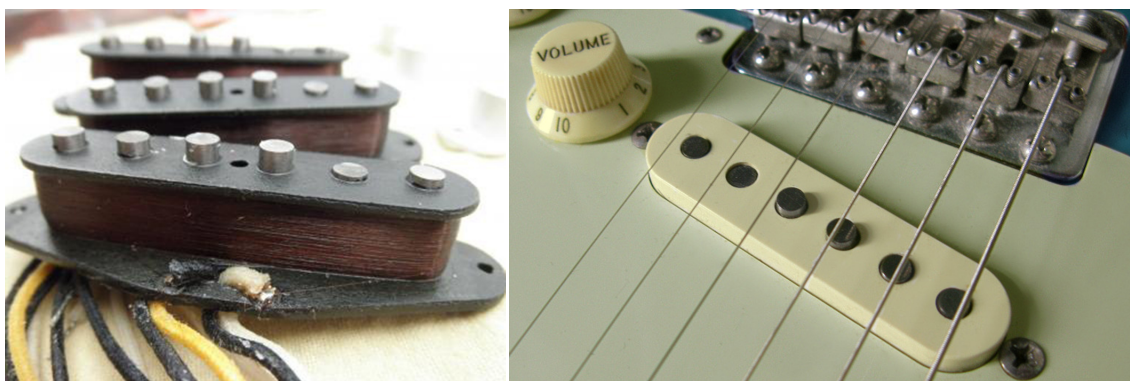


Figura 15. Pickups amb els imants a diferents alçades.

Fonts: <http://www.gushmag.it/wp-content/uploads/2014/04/83bda3342a6d625686a59e699dfa578a.jpg>
<http://1.bp.blogspot.com/-TdDSMU0fS1Q/TvZoSvfuY5I/AAAAAAAAABtM/PErVvHq3Pwk/s1600/Texas%2BSpecial.jpg>

A la figura 15 es poden veure *pickups* simples que presenten diferents posicions dels imants en funció de la corda a la qual corresponen. Les cordes que es vol que presentin un volum més alt, per tant que tinguin més presència en la sonoritat de la guitarra, se'ls col·loca el seu imants més a prop, en canvi les que es vol que tinguin presència se'ls col·loca l'imant més lluny. El model comercial més conegut que presenta aquesta varietat en l'alçada dels imants és la sèrie *Texas Special* i *Tex-Mex* de *Fender*. En aquest cas, l'alçada dels imants ve fixada pel fabricant i no pot ésser modificada per l'usuari, però hi ha models en els que la posició de cada imant pot ser ajustada pel guitarrista. A la figura 14 es pot observar com a una de les dues bobines que formen el *pickup*, s'hi pot ajustar l'alçada dels imants mitjançant uns pernns de cabota plana. Així el guitarrista pot triar quines de les cordes tindran més volum i quines menys en el conjunt sonor resultant de la guitarra.

CAPÍTOL 3: ESTAT DE L'ART DE L'ELECTRÒNICA DE LA GUITARRA ELÈCTRICA

La majoria de les guitarres i baixos elèctrics presenten controls de volum i to per tal d'evitar haver d'ajustar constantment els controls de l'amplificador al qual es connecta l'instrument. La manera d'implementar aquests controls es va dissenyar fa varies dècades i no ha evolucionat gaire des que va sortir per primera vegada al mercat.

El control més important que es pot trobar a una guitarra és el volum. Hi ha dues connexions possibles per al potenciòmetre de volum. La primera es tracta d'un divisió de tensió, com es mostra a la figura 16 a). Quan es baixa el volum, es a dir, quan el cursor del potenciòmetre es mou cap a massa, el pic de ressonància disminueix degut a la part de pista resistiva que queda entre el *pickup* i el cursor. Aquest efecte pot esser minimitzat si es col·loca un condensador entre el cursor del potenciòmetre i l'extrem que no està connectat a massa. El valor d'aquest condensador és triat mitjançant el mètode de prova i error, i depèn del gust del guitarrista que ha d'utilitzar la guitarra. Un bon valor per començar a provar serien 470 pF.

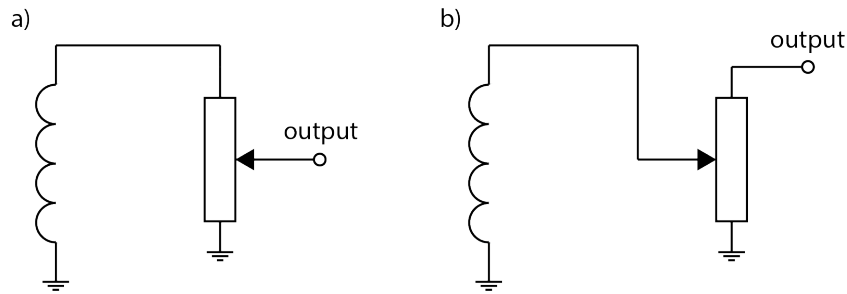


Figura 16. a) Connexió forward. b) Connexió reversed.

La segona manera de connectar un potenciòmetre de volum en una guitarra elèctrica és menys comú però també s'utilitza. Es tracta de connectar un extrem del *pickup* al cursor del potenciòmetre i l'altre a massa. La sortida es pren de l'extrem del potenciòmetre que no està connectat a massa. En aquest cas el fenomen explicat anteriorment per a la primera opció s'exagera de forma considerable, ja que a mesura que quan es mou el cursor del potenciòmetre, es varia la càrrega aplicada sobre el *pickup*. A més, quan es baixa completament el volum, el cursor es troba en contacte amb l'extrem del potenciòmetre connectat a massa i el *pickup* es troba curtcircuitat. A la figura 16 b) hi ha representada aquesta manera de connectar el potenciòmetre de volum.

Des del punt de vista elèctric, la segona opció té molt poc sentit, per tant, en la majoria dels casos és millor utilitzar la primera opció. De tota manera, l'única manera d'aconseguir un control de volum que no afecti a la sonoritat del *pickup* és utilitzar electrònica activa, però aquest no és l'objecte d'estudi d'aquest projecte.

Pel que fa als valors dels potenciòmetres, el més habitual és trobar potenciòmetres de 250 k Ω , per a guitarres amb *pickups* simples i 500 k Ω per a guitarres amb *pickups* dobles connectats en sèrie. La raó per la qual es fa aquesta distinció entre *sigles coils* i *humbuckers* és perquè els dobles connectats en sèrie proporcionen el doble de tensió que els simples, per tant, se'ls aplica el doble de càrrega. Actualment, els valors normalitzats d'aquests potenciòmetres són 220 k Ω i 470 k Ω . També són habitual, però no tant, els potenciòmetres de 1 M Ω . En alguns casos excepcionals es poden trobar potenciòmetres de 300 k Ω o 330 k Ω .

Un altre control molt important que presenten gairebé totes les guitarres i baixos elèctrics és el control anomenat *tone* (*tone* en anglès). Aquest circuit és un filtre passa-baixos que permet disminuir la presència d'aguts (freqüències altes de l'espectre audible).

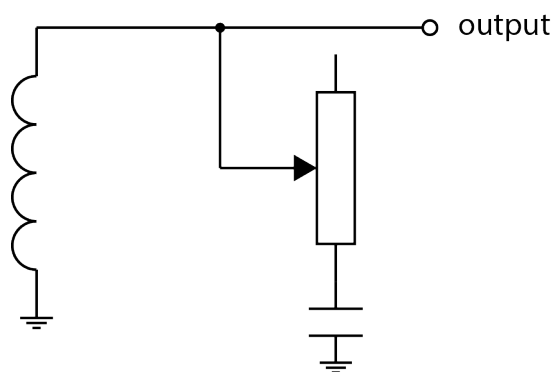


Figura 17. Connexió del control de to.

A la figura 17 es representa la manera d'implementar el control de to de la guitarra elèctrica. El filtre passa-baixos és de segon ordre, ja que està format per la component inductiva del bobinat del *pickup*, el condensador connectat al potenciòmetre i la component resistiva del coure de la bobina. El valor del condensador del control de to és habitual que sigui de 22 nF (típic de *Gibson*) o 47 nF (típic de *Fender*). Com més gran és el valor del condensador, més baixa és la freqüència de tall del filtre passa-baixos i, per tant, més freqüències agudes són atenuades.

Amb això ja es pot formar un senzill circuit per a una guitarra elèctrica. Aquest circuit consta d'un *pickup*, un control de to i un de volum. A la figura 18 hi ha representat aquest senzill circuit.

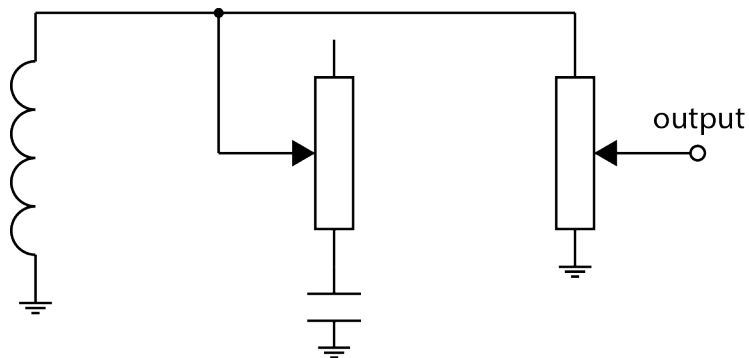


Figura 18. Circuit bàsic per a guitarra elèctrica.

A continuació es mostraran i explicaran els circuits que presenten les guitarres o baixos més habituals en el mercat.

3.1. Fender Telecaster

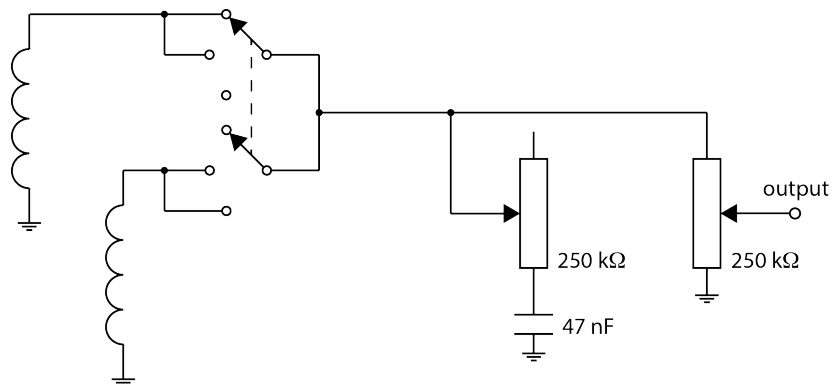


Figura 19. Circuit de la Fender Telecaster.

A la figura 19 hi ha representat el circuit elèctric d'una guitarra *Fender Telecaster*. Aquest serà el primer en ser analitzat degut a la seva senzillesa. Aquest esquema és molt típic en guitarres que tenen dos *pickups*, presenta un interruptor de tres posicions i dos circuits que permet connectar un *pickup*, l'altre, o els dos en paral·lel a la seva posició intermèdia. Els controls de to i volum son comuns per als dos *pickups*. Aquest circuit va sortir al mercat durant la dècada de 1960, les versions anteriors no permetien connectar els dos *pickups* a la vegada.

3.2. Fender Mustang

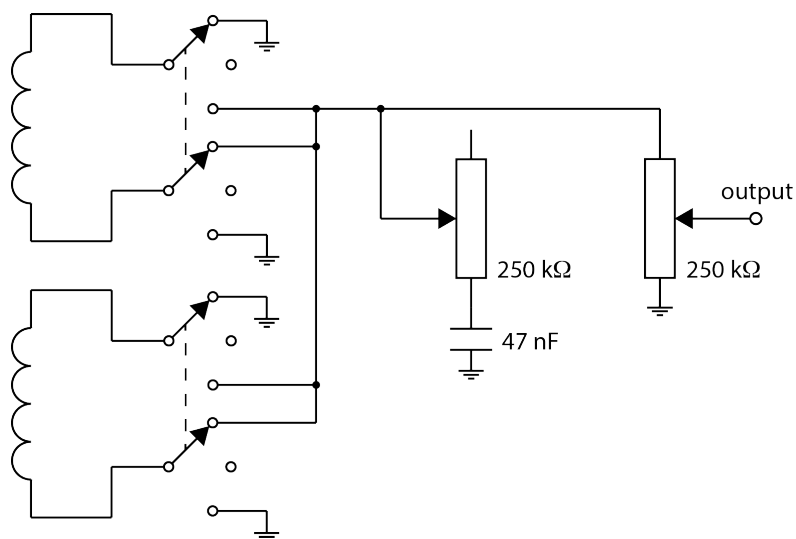


Figura 20. Circuit de la Fender Mustang.

La guitarra *Fender Mustang* presenta un interruptor de tres posicions i dos circuits per a cada *pickup*. A la posició intermèdia de l'interruptor, el *pickup* queda desconnectat. A cada un dels extrems, el *pickup* està connectat però en un extrem està connectat en fase i a l'altre extrem en la fase oposada. Fou la primera guitarra que va permetre connectar dos *pickups* en oposició de fase. Els controls de volum i to, a l'igual que en el cas de la *Telecaster*, són comuns per als dos *pickups*.

3.3. *Fender Jazz Bass*

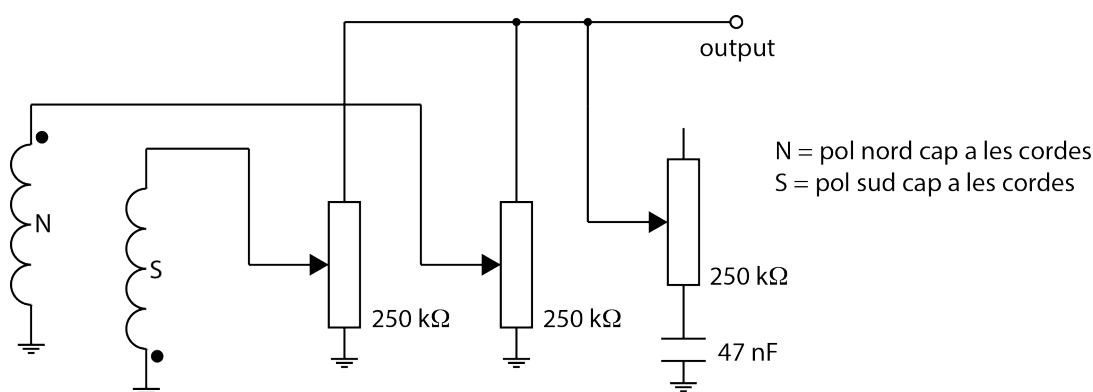


Figura 21. Circuit del Fender Jazz Bass.

El de la figura 21 és l'esquema del baix elèctric *Fender Jazz Bass*, aquest funciona sense interruptors, ja que utilitza un potenciòmetre de volum per a cada *pickup*. Els potenciòmetres de volum estan connectats com a la figura 16 b), ja que es la manera d'aconseguir dos volums independents, el problema és que, com s'ha explicat abans, es pot curtcircuitar el *pickup*. Cal destacar que els imants dels dos *pickups* d'aquest baix tenen polaritats oposades, en el cas del *pickup* més pròxim al pont el pol sud dels imants apunta cap a les cordes, en canvi al *pickup* més proper al màstil ho fa el pol nord. Els sentits del bobinat dels *pickups* també es oposat, així quan els dos potenciòmetres de volum estan ajustats a la mateixa posició es produeix el mateix efecte d'eliminació de soroll que en el cas d'un *pickup humbucker*.

3.4. Fender Stratocaster

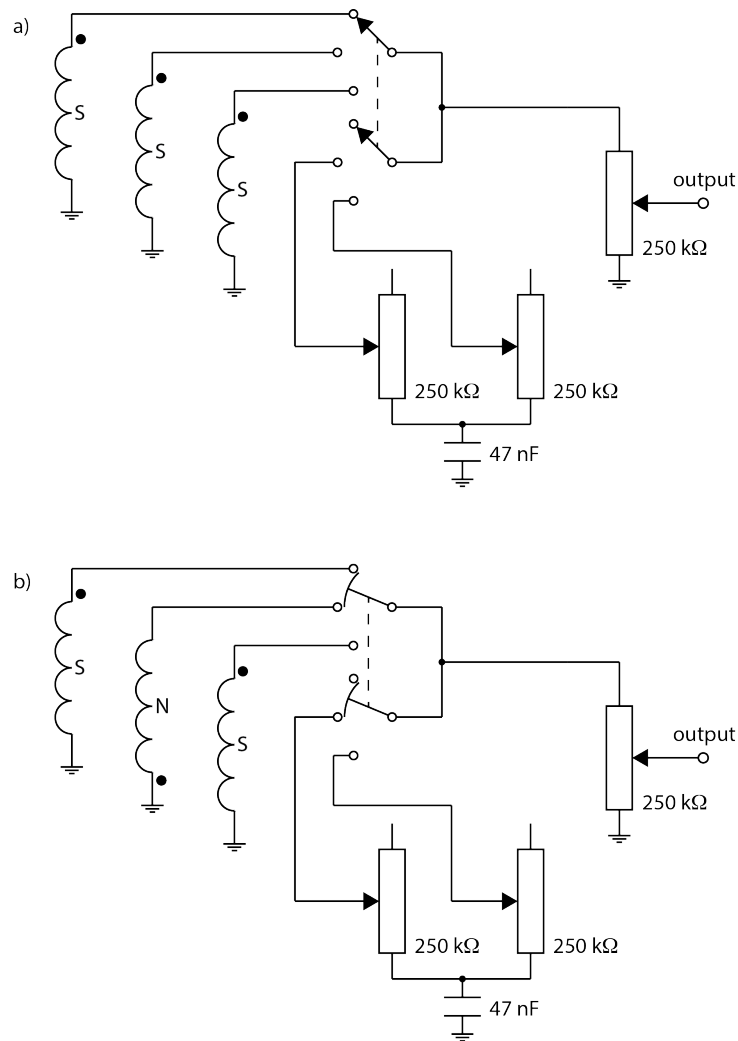


Figura 22. Circuit de la Fender Stratocaster.

A la figura 22 hi ha representats dos esquemes per a la guitarra *Fender Stratocaster*. El de la figura 22 a) és el que es pot trobar en els models més antics d'aquesta guitarra, utilitzava el mateix interruptor de tres posicions i dos circuits que la *Fender Telecaster*, que permetia connectar cada un dels tres *pickups* per separat, però no era possible connectar-ne dos d'ells o els tres junts. Utilitzava dos controls de to per als *pickups* central i proper al màstil, el *pickup* proper al pont no tenia control de to. Molts fabricants han copiat la forma del cos d'aquesta guitarra i també el seu circuit, però a la dècada dels 70 *Ibanez* va substituir l'interruptor de tres posicions per un de cinc, que afegia dues posicions intermèdies. Aquestes dues noves posicions permetien connectar en paral·lel dos dels tres *pickups*. Degut a l'èxit d'aquesta modificació *Fender* es va veure obligat a incorporar aquest tipus d'interruptor. Una altra innovació dels models més recents respecte dels primers és que es va invertir la polaritat dels imants i el sentit del bobinat del *pickup* central. A l'igual que al *Jazz Bass*, això permet que

en les posicions intermèdies 2 i 4 de l'interruptor es produeixi eliminació de soroll.

3.5. *Brian May Red Special*

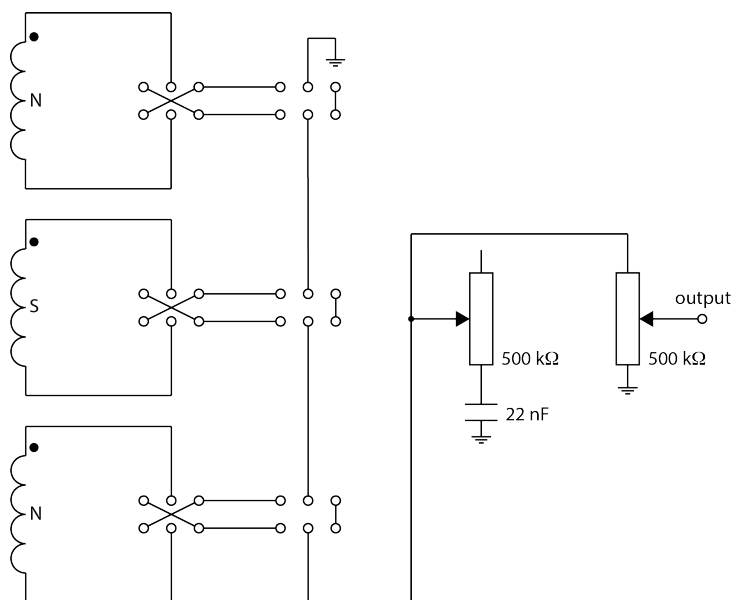


Figura 23. Circuit de la Brian May Red Special.

La *Brian May Red Special* és la guitarra del guitarrista de la banda britànica *Queen*. Aquesta guitarra va ser dissenyada i construïda per ell mateix amb l'ajuda del seu pare, que era enginyer electrònic. Igual que la *Fender Stratocaster*, aquesta guitarra també té tres *pickups*, cada un d'ells és controlat per dos interruptors de dues posicions i dos circuits o DPDT (sis en total). El primer serveix per seleccionar la fase amb la qual es vol connectar el *pickup* i el segon per seleccionar si es vol connectar o no el *pickup*. Cal destacar que aquest sistema d'interruptors permet totes les possibles connexions en sèrie dels tres *pickups*, però no en permet cap en paral·lel. Després dels interruptors s'incorporen un control de to i un de volum generals. En aquest cas, a diferència de tots els anteriors, els potenciómetres són de 500 k Ω , enlloc de 250 k Ω , això es degut a que la possibilitat de connectar *pickups* en sèrie fa que la tensió de sortida augmenti, i per tant, s'aplica una càrrega més elevada.

3.6. Gibson Les Paul

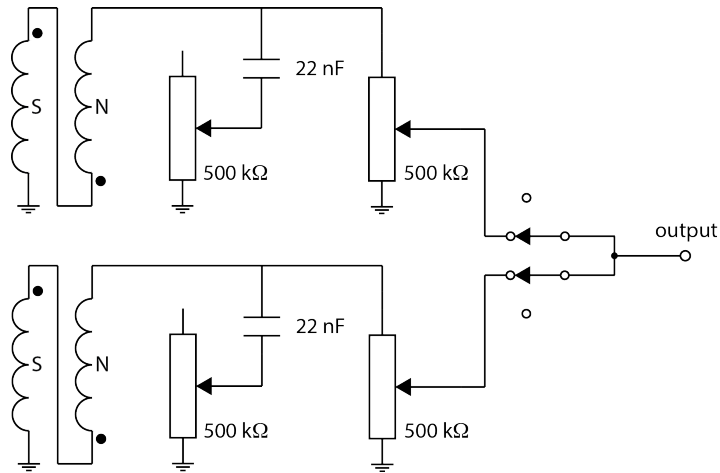


Figura 24. Circuit de la Gibson Les Paul.

Per últim s'analitzarà el circuit de la guitarra *Gibson Les Paul*, que es el de la figura 24. És un circuit molt habitual en guitarres que incorporen dos *pickups* dobles. En aquest cas, els dos bobinats de cada un dels *pickups*, està prèviament connectar en sèrie, de manera que no pot ser modificat per l'usuari mentre s'està tocant la guitarra. Aquest circuit té un control de volum i un de to per a cada un dels *pickups*. Com és habitual en *humbuckers*, els potenciòmetres són de 500 kΩ. Un interruptor de tres posicions permet combinar els *pickups*, de manera que poden ésser utilitzats cada un d'ells per separat o els dos en paral·lel. Noti's que a la posició central els controls de volum no son independents i que si en un dels dos es desplaça el cursor fins que faci contacte amb el terminal connectat a massa, el volum general de la guitarra serà zero, encara que l'altre potenciòmetre es trobi en la posició totalment oposada.

CAPÍTOL 4: DISSENY DEL PROTOTIP

4.1. La guitarra d'aquest projecte

La guitarra que s'ha triat per a realitzar aquest projecte és una *Fender Stratocaster Standard*. És una guitarra molt utilitzada i s'ha pensat que el fet de que sigui tan comú entre els guitarristes la feia una bona opció per a realitzar aquest projecte.



Figura 25. Guitarra utilitzada en aquest projecte.

Font: <http://www.fender.com/guitars/stratocaster/standard-stratocaster-rosewood-fingerboard-arctic-white-no-bag/>

Aquesta guitarra té tres *pickups*, la qual cosa fa que tingui moltes possibilitats de combinació. Com es pot observar a la figura 25, disposa d'una tapa de plàstic anomenada colpejador sobre la qual hi estan muntats gran part dels components electrònics de la guitarra. El fet de que els *pickups*, control de to i volum, i el selector de *pickups*, estiguin muntats directament al colpejador és un punt més a favor d'aquesta guitarra per aquest projecte.

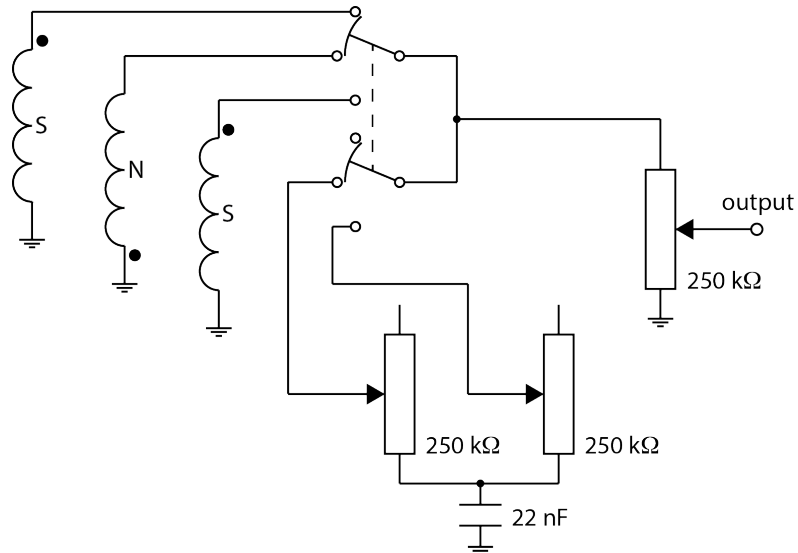


Figura 26. Circuit de original de la guitarra utilitzada en aquest projecte.

El circuit elèctric de la figura 26 és el que incorpora la guitarra utilitzada en aquest projecte de sèrie. Disposa de tres *pickups*, el central té el sentit del camp magnètic i del bobinat oposat als altres dos, aquests són combinats mitjançant un interruptor de cinc posicions. Incorpora dos controls de to amb un condensador de 22 nF i un control de volum general.

4.1.1. Els pickups

Aquesta guitarra incorpora *pickups single coil* de la marca *Fender*. Aquests *pickups* tenen dos imants llargs a la part de sota i sis cilindres de material ferromagnètic que faciliten la distribució del camp magnètic a través de la bobina i les cordes.

Per tal de poder comprovar el comportament freqüencial explicat anteriorment, s'ha realitzat l'experiment pertinent. El procediment ha consistit en enfrontar dos *pickups* de manera que el que s'aconseguia era un transformador on cada un dels *pickups* feien la funció de primari i secundari respectivament. Es van anar aplicant la mateixa tensió alterna al primari variant la freqüència i anotant la tensió que presentava el *pickup* que feia de secundari als extrems de la seva bobina. Amb això es va poder esbrinar on es produeix el pic de ressonància i quina alçada té. A partir d'això s'ha pogut estimar els valors dels components que formen el model dels *pickups* que incorpora la guitarra que s'ha utilitzat en aquest projecte.

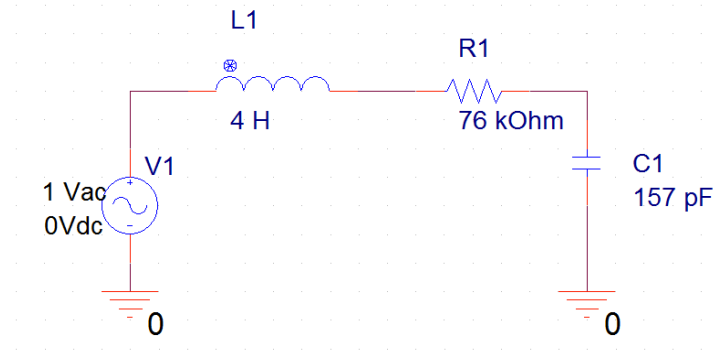


Figura 27. Model en PSpice dels pickups de la guitarra d'aquest projecte.

$$H(s) = \frac{1}{LCs^2 + RCs + 1} = \frac{1}{6,28 \cdot 10^{-10} s^2 + 1,19 \cdot 10^{-5} s + 1} \quad (3)$$

A la figura 27 hi ha representat el circuit elèctric que modela el comportament freqüencial dels *pickups* utilitzats en aquest projecte. Aquest model té la resposta freqüencial de la figura 28.

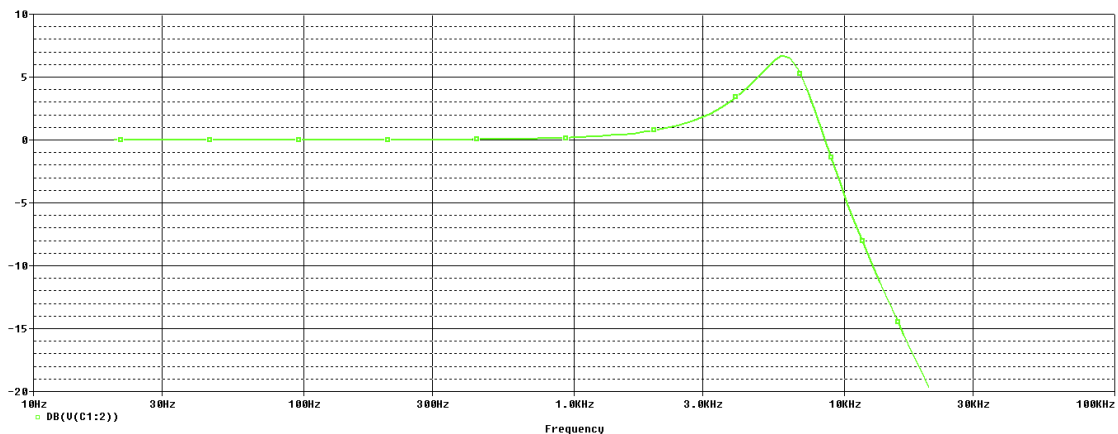


Figura 28. Resposta freqüencial dels pickups de la guitarra d'aquest projecte.

El pic de ressonància dels *pickups* d'aquesta guitarra es produeix a la freqüència de 6 kHz i es produeix amb una magnitud de 6,7 dB.

4.2. Modificacions realitzades

4.2.1. Combinació de pickups

La majoria de guitarres tenen més d'un *pickup*, però per norma general, disposen de poques combinacions possibles. El més normal és que es pugui seleccionar un dels *pickups* o dos en paral·lel. Si es compara la combinatòria possible de la que disposa un guitarra amb tres *pickups*, amb la que disposa

normalment, es pot observar una diferència molt gran. Per tant, es dedueix que hi ha moltes combinacions possibles desaprovechades.

Després d'estudiar i analitzar els diferents circuits típics de guitarres elèctriques comercials i la falta d'aprofitament de les possibilitats que presenta una guitarra elèctrica com la que s'utilitza en aquest projecte, s'ha dissenyat una solució per aprofitar la combinació de *pickups* en major mesura.

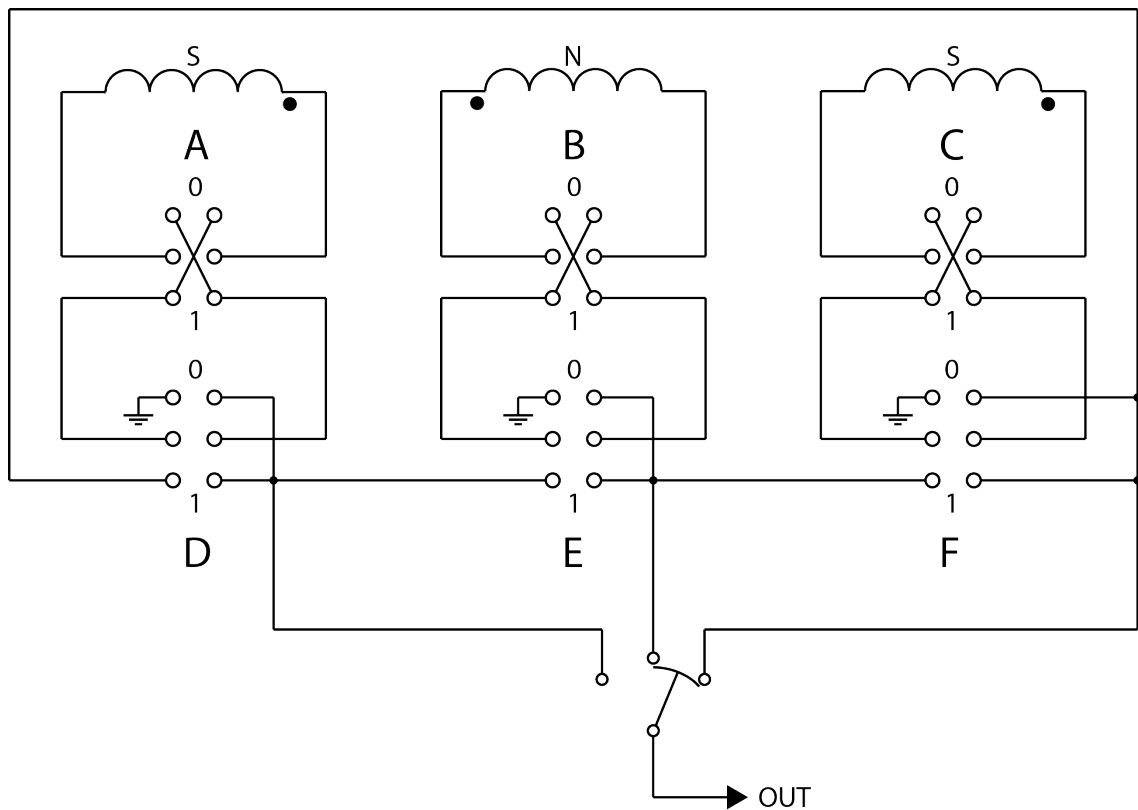


Figura 29. Circuit dissenyat per a la combinació de pickups.

A la figura 29 hi ha representat el circuit que permet combinar els *pickups* de forma més completa. Com es pot observar, disposa de sis interruptors de dues posicions i dos circuits o DPDT i l'interruptor de cinc posicions original de la *Fender Stratocaster*. Els interruptors A, B i C possibiliten la tria de la fase amb la que es vol connectar el *pickup*. A la posició 1 el *pickup* és connectat amb la fase que originalment estava connectat de manera permanent, i a la posició 0 es connecta amb la fase oposada.

Per altra banda, els interruptors D, E i F, permeten la connexió dels *pickups* en sèrie entre ells. Com es pot observar a la figura 29, a la posició 0 d'aquests interruptors, un extrem del *pickup* corresponent és connectat a massa, en canvi, a la posició 1, aquest extrem que abans estava connectat a massa passa a estar connectat a l'interruptor del *pickup* anterior. A la taula 2 hi ha descrites totes les possibles combinacions d'aquests tres interruptors.

Taula 2. Taula d'estats dels interruptors D, E i F.

	D	E	F
a	0	0	0
b	0	0	1
c	0	1	0
d	0	1	1
e	1	0	0
f	1	0	1
g	1	1	0
h	1	1	1

Aquestes vuit combinacions possibles generen les connexions representades a la figura 30.

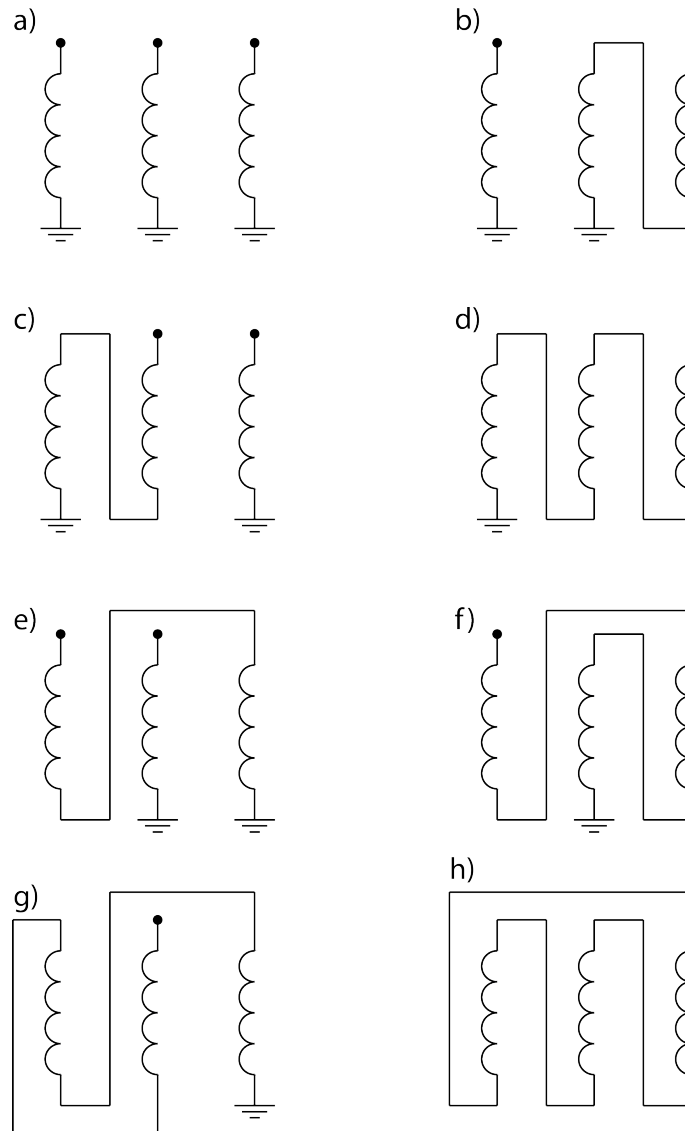


Figura 30. Possibles connexions generades pels estats dels interruptors D, E i F.

A aquestes vuit opcions que proporcionen els interruptors D,E i F, se'ls han d'afegir, per a cada una d'elles, les opcions que proporcionen els interruptor A, B i C, el que genera un total de 64 combinacions diferents possibles. Cal destacar que el fet de que un dels *pickups* disposi de camp magnètic i bobinat en sentit contrari als altres dos possibilita que es puguin realitzar combinacions on es produeixi eliminació de soroll al igual que en un *pickup humbucker*.

A part de les combinacions que proporcionen els interruptors A, B, C, D, E i F, s'hi han d'afegir les possibilitats que genera l'interruptor de cinc posicions. A les posicions 1, 3 i 5, permet seleccions quin serà el primer *pickup*, del circuit sèrie que hagi estat seleccionat amb els interruptors D, E i F. I a les posicions 2 i 4, el que permet es la connexió de dos *pickups* en paral·lel o d'un *pickup* en paral·lel amb dos que estan connectats en sèrie.

S'ha considerat que aquesta combinació de set interruptors era la que possibilitava el màxim de combinacions possibles per a tres *pickups*. El problema de disposar d'un nombre tan elevat de combinacions és que sempre n'hi haurà algunes que siguin gairebé inútils des del punt de vista musical.

Per tal de comprovar que les combinacions d'interruptors tenien el comportament esperat, es va realitzar un prova una vegada connectats els set interruptors. El procediment consistí en col·locar un *pickup* a sobre de cada un dels *pickups* muntats a la guitarra. D'aquesta manera, es podia aplicar una tensió d'una freqüència fixa als *pickups* s'havien afegit i comprovar la tensió que apareixia a cada un dels *pickups* de la guitarra i després dels interruptors. A continuació és mostren els resultats obtinguts per a cada una de les combinacions de *pickups*.

- 1 *pickup* en fase

Taula 3. Estats dels set interruptors per aquest cas.

A	B	C	D	E	F	S
1	X	X	0	0	0	1

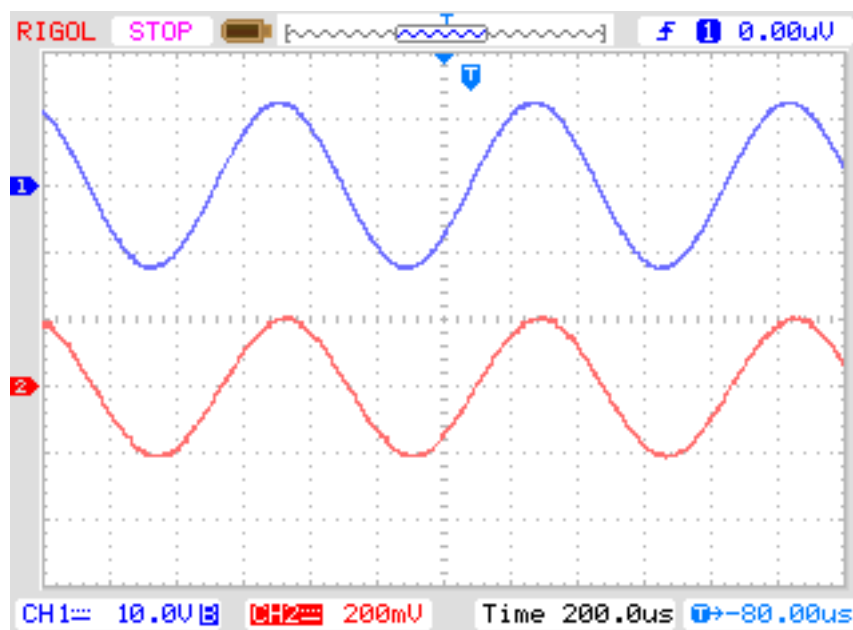


Figura 31. Tensió d'entrada (senyal blau) i tensió de sortida (senyal vermell) per a un *pickup* en fase.

Aquesta és la combinació més simple que es pot obtenir, com es pot observar a la figura 31, la tensió després dels interruptors (senyal vermell) presenta la mateixa fase que la tensió que s'ha aplicat als *pickups* que fan de emissors de camp magnètic. Es pot considerar la tensió que presenta un sol *pickup* en fase com a la tensió de referència per a la resta d'aquesta prova.

- 1 pickup en contrafase

Taula 4. Estats dels set interruptors per aquest cas.

A	B	C	D	E	F	S
0	X	X	0	0	0	1

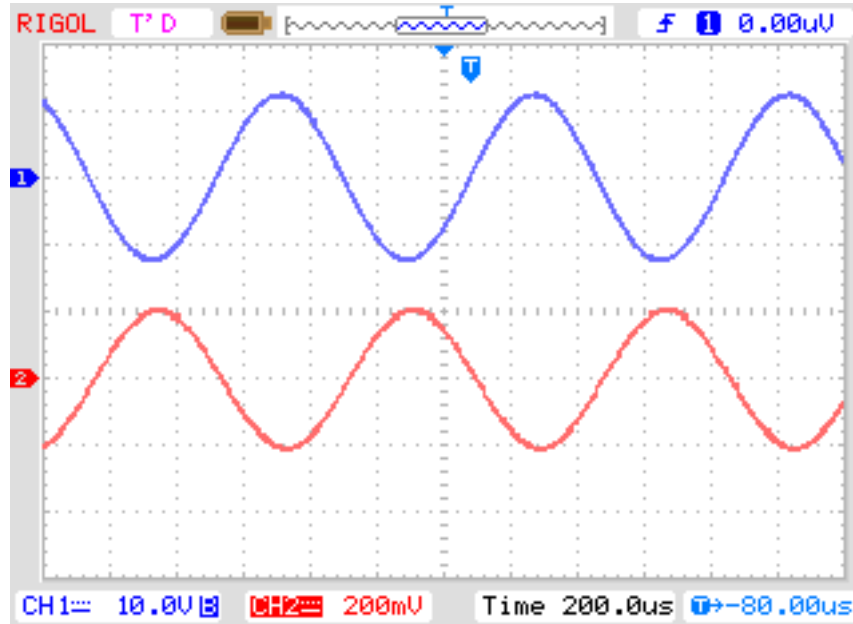


Figura 32. Tensió d'entrada (senyal blau) i tensió de sortida (senyal vermell) per a un pickup en contrafase.

En aquest cas, l'únic que s'ha canviat respecte del cas anterior és l'interruptor que determina la fase amb la qual és connectat el pickup. A la figura 32 s'observa com la tensió que presenta el pickup (senyal vermell) té la mateixa magnitud que en el primer cas però està desfasada 180°.

- 2 pickups en sèrie en fase

Taula 5. Estats dels set interruptors per aquest cas.

A	B	C	D	E	F	S
1	1	X	0	1	0	3

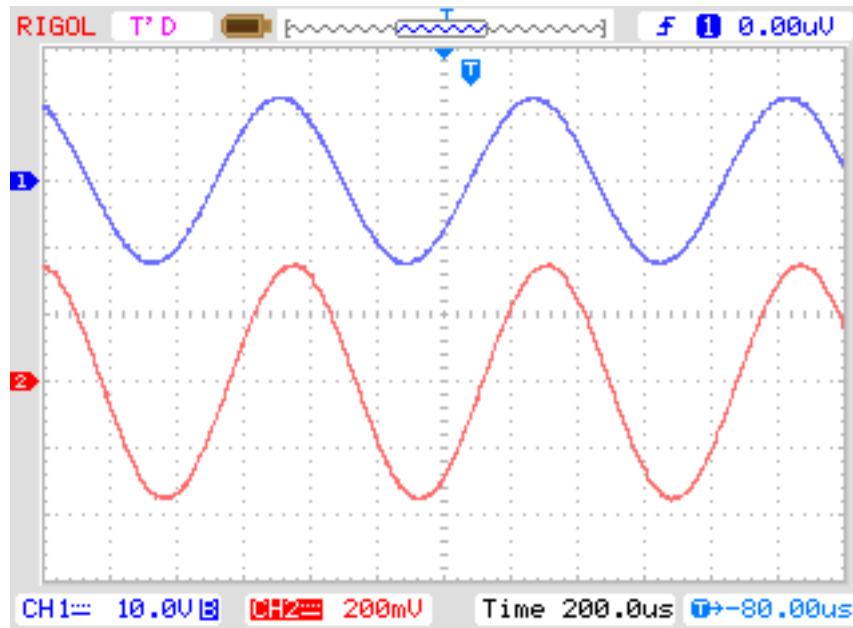


Figura 33. Tensió d'entrada (senyal blau) i tensió de sortida (senyal vermell) per a dos pickups en sèrie en fase.

A la figura 33 es pot observar el resultat de la suma que es produeix al connectar dos *pickups* en sèrie i en fase. com es pot comprovar, la tensió (senyal vermell) és més gran que la tensió de referència, però no arriba a ser el doble.

- 2 *pickups* en sèrie en contrafase

Taula 6. Estats dels set interruptors per aquest cas.

A	B	C	D	E	F	S
0	0	X	0	1	0	3

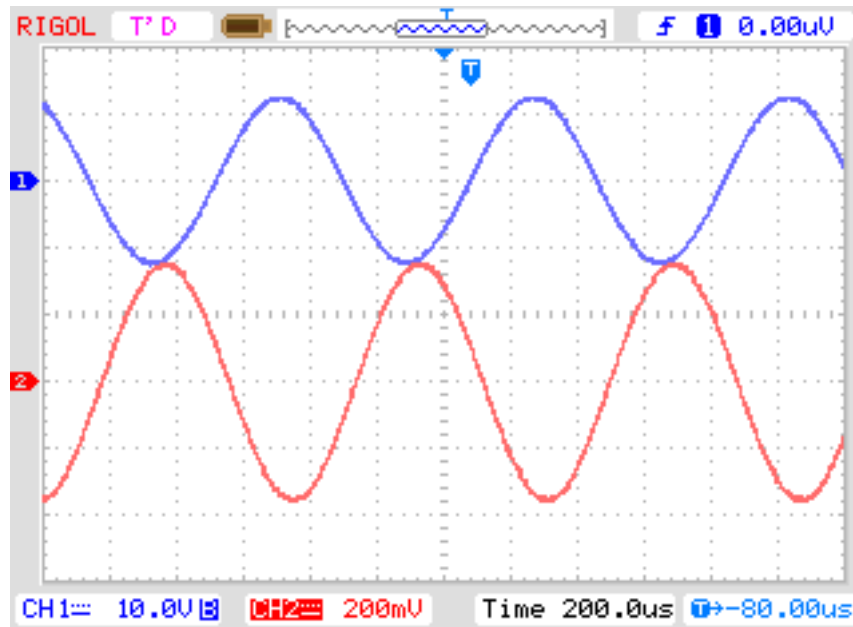


Figura 34. Tensió d'entrada (senyal blau) i tensió de sortida (senyal vermell) per a dos pickups en sèrie en contrafase.

Aquest cas és igual que l'anterior però els dos *pickups* es troben en contrafase però els dos tenen la mateixa fase, això fa que les tensions es sumin igualment però la tensió resultant està desfasada 180° respecte de la tensió d'entrada.

- 2 *pickups* en sèrie amb fase oposada

Taula 7. Estats dels set interruptors per aquest cas.

A	B	C	D	E	F	S
1	0	X	0	1	0	3

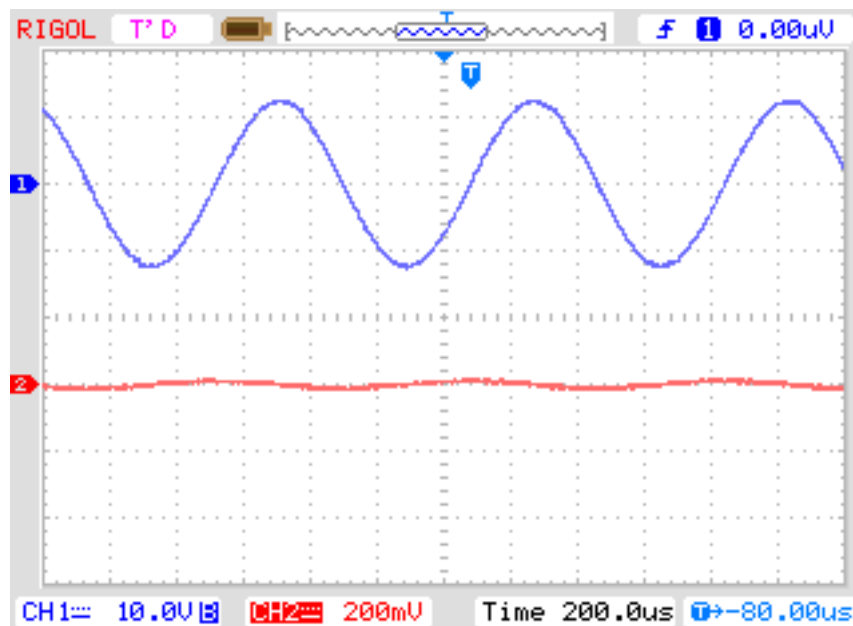


Figura 35. Tensió d'entrada (senyal blau) i tensió de sortida (senyal vermell) per a dos pickups en sèrie amb fase oposada.

En aquest cas, els *pickups* estan connectats de manera que les seves fases són diferents una respecte de l'altre. Com es pot observar a la figura 35, els senyals dels dos *pickups* són restats i la sortida és pràcticament nul·la.

- 3 *pickups* en sèrie en fase

Taula 8. Estats dels set interruptors per aquest cas.

A	B	C	D	E	F	S
1	1	1	0	1	1	5

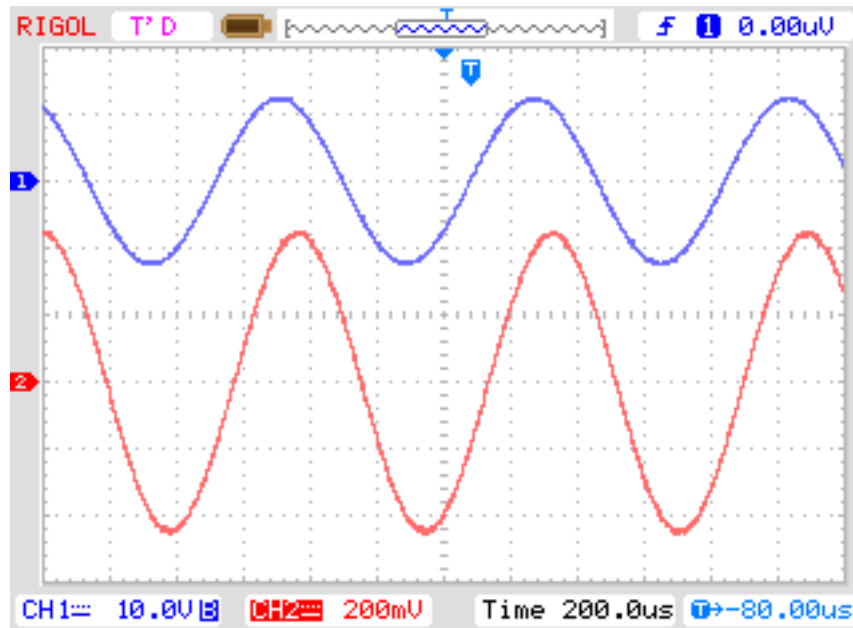


Figura 36. Tensió d'entrada (senyal blau) i tensió de sortida (senyal vermell) per a tres pickups en sèrie en fase.

Aquesta és la combinació amb la que s'obté la major tensió de sortida, quan es connecten tots tres *pickups* en sèrie i en fase entre ells. Com s'observa a la figura 36, la tensió és molt més elevada que la tensió de referència, si bé no arriba a ser el triple.

- 3 *pickups* en sèrie en contrafase

Taula 9. Estats dels set interruptors per aquest cas.

A	B	C	D	E	F	S
0	0	0	0	1	1	5

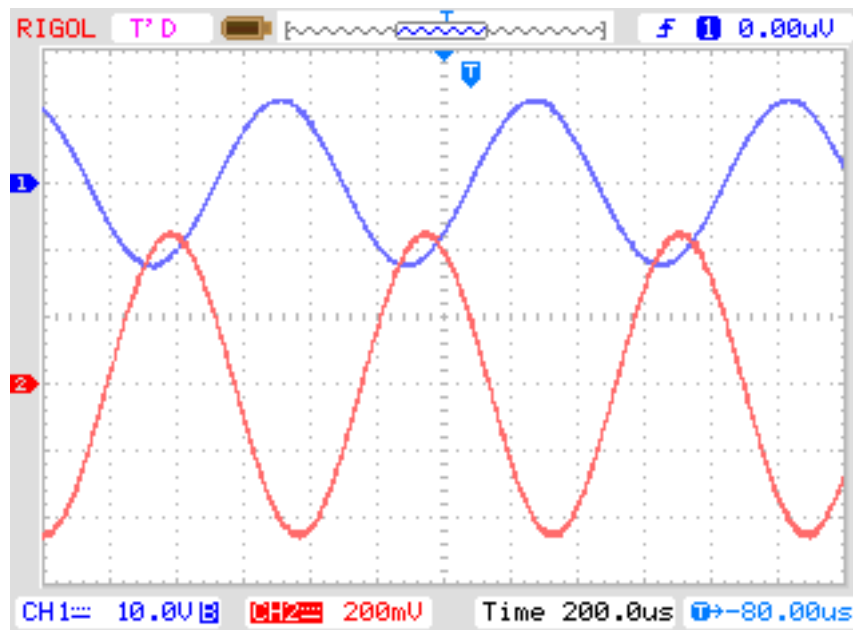


Figura 37. Tensió d'entrada (senyal blau) i tensió de sortida (senyal vermell) per a tres pickups en sèrie en contrafase.

Aquest cas és igual que l'anterior amb la diferència que els tres *pickups* es troben en fase contrafase respecte de com estaven en el cas anterior.

- 3 *pickups* en sèrie, 2 en fase i 1 amb fase oposada

Taula 10. Estats dels set interruptors per aquest cas.

A	B	C	D	E	F	S
1	0	1	0	1	1	5

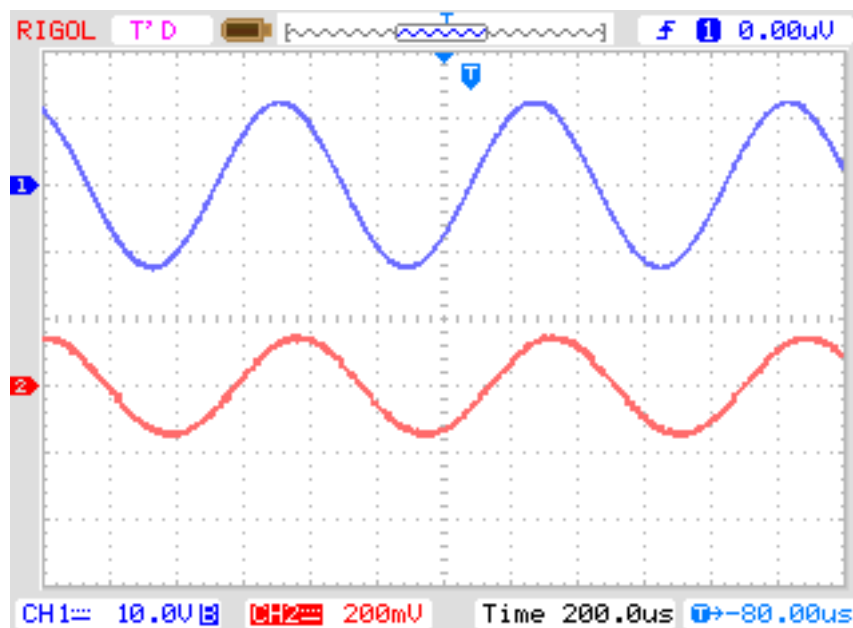


Figura 38. Tensió d'entrada (senyal blau) i tensió de sortida (senyal vermell) per a tres pickups en sèrie, dos en fase i un amb fase oposada.

Aquesta combinació s'obté amb els tres *pickups* en sèrie, però un d'ells es troba en fase oposada a la dels altres dos. Amb això s'obté un altre nivell de tensió possible un poc inferior a la tensió de referència.

- 3 *pickups* en sèrie, 1 en fase i 2 amb fase oposada

Taula 11. Estats dels set interruptors per aquest cas.

A	B	C	D	E	F	S
0	1	0	0	1	1	5

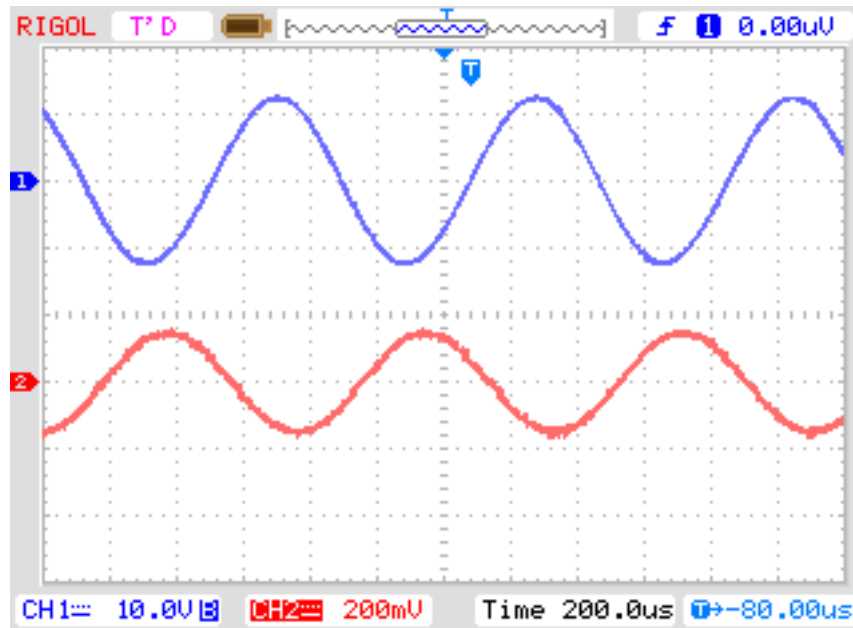


Figura 39. Tensió d'entrada (senyal blau) i tensió de sortida (senyal vermell) per a tres *pickups* en sèrie, un en fase i dos amb fase oposada.

Aquest cas és igual que l'anterior però s'han invertit les fases de tots els *pickups* respecte del cas anterior. Comparant aquests dos casos es pot observar com la fase resultant de la tensió de sortida (senyals vermells) es correspon amb la fase dels dos *pickups* que coincideixen.

- 2 *pickups* en paral·lel en fase

Taula 12. Estats dels set interruptors per aquest cas.

A	B	C	D	E	F	S
1	1	X	0	0	0	2

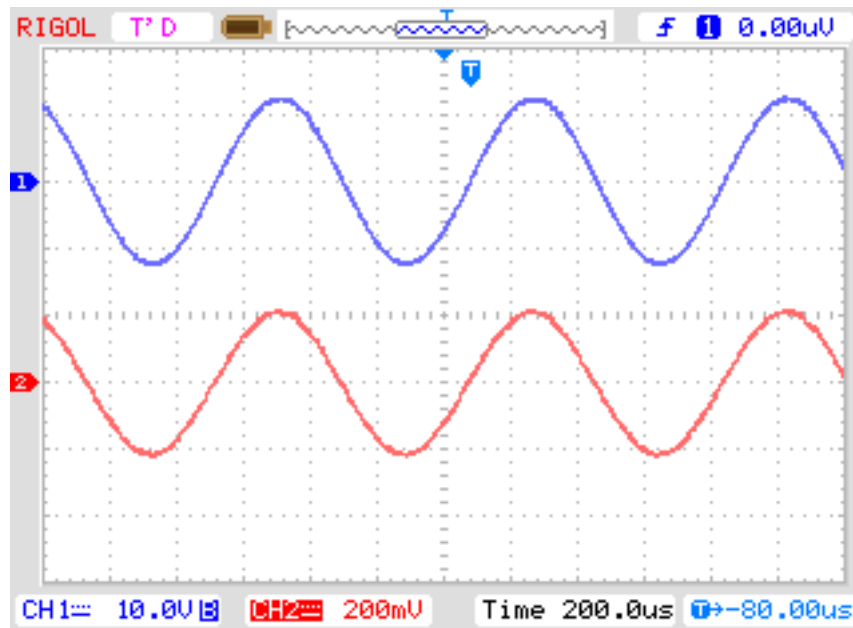


Figura 40. Tensió d'entrada (senyal blau) i tensió de sortida (senyal vermell) per a dos pickups en paral·lel en fase.

A partir d'aquí és comença a fer ús de les posicions 2 i 4 de l'interruptor de cinc posicions (S) per tal de connectar *pickups* en paral·lel. Al connectar *pickups* en paral·lel no s'observen canvis en la tensió, el que passa és que es sumen les intensitats que travessen les bobines d'ambdós *pickups*.

- 2 *pickups* en paral·lel en contrafase

Taula 13. Estats dels set interruptors per aquest cas.

A	B	C	D	E	F	S
0	0	X	0	0	0	2

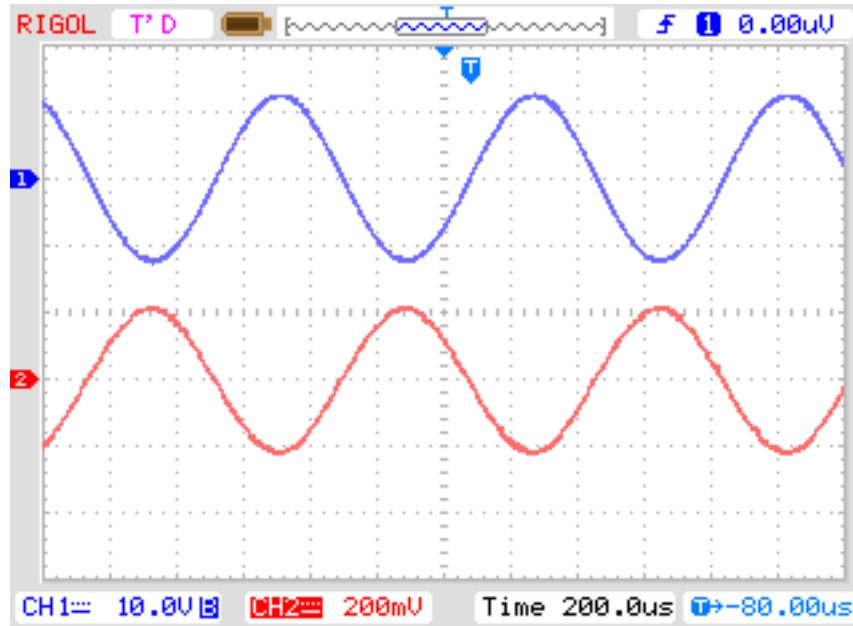


Figura 41. Tensió d'entrada (senyal blau) i tensió de sortida (senyal vermell) per a dos pickups en paral·lel en contrafase.

Aquesta combinació és igual que l'anterior amb la diferència que els dos *pickups* es troben en contrafase. Es pot observar a la figura 41 com la tensió de sortida (senyal vermell) està desfasat 180° respecte del cas anterior.

- 2 *pickups* en paral·lel amb fase oposada

Taula 14. Estats dels set interruptors per aquest cas.

A	B	C	D	E	F	S
1	0	X	0	0	0	2

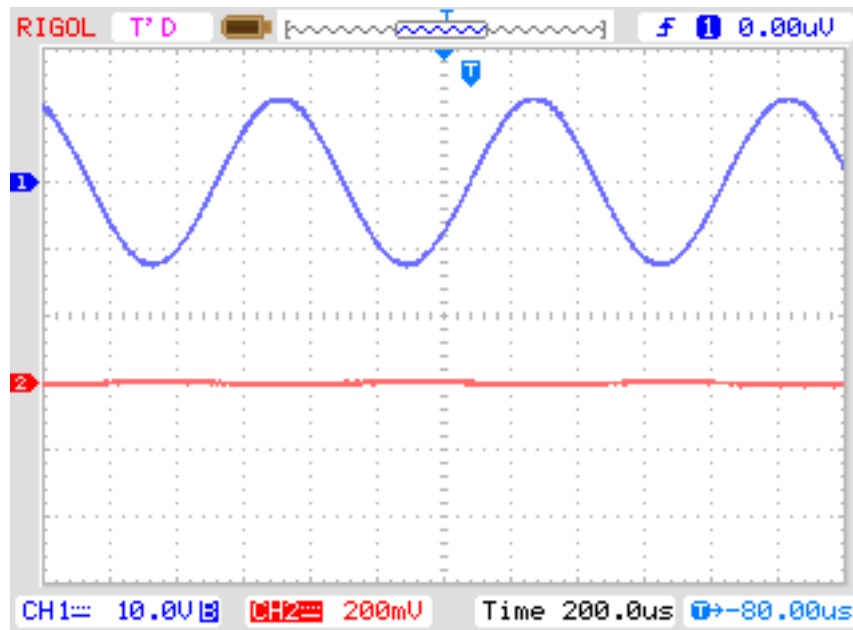


Figura 42. Tensió d'entrada (senyal blau) i tensió de sortida (senyal vermell) per a dos pickups en paral·lel amb fase oposada.

En aquest cas es pot observar com, al igual que en al cas de la connexió en sèrie, la sortida és gairebé nul·la en el cas de connectar dos *pickups* en fase oposada.

- 2 *pickups* en sèrie en paral·lel amb 1 *pickup*, tots en fase

Taula 15. Estats dels set interruptors per aquest cas.

A	B	C	D	E	F	S
1	1	1	0	1	0	4

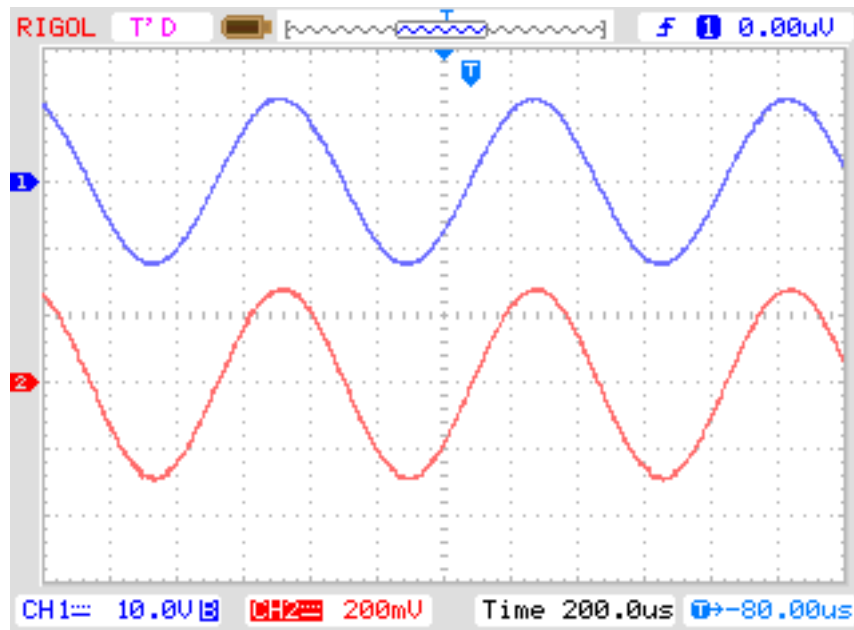


Figura 43. Tensió d'entrada (senyal blau) i tensió de sortida (senyal vermell) per a dos pickups en sèrie en paral·lel amb un pickup, tot en fase.

Aquest cas demostra la gran possibilitat de combinatòria del sistema de set interruptors, ja que permet fer combinacions de connexions sèrie i paral·lel. En aquest cas la tensió resultant és superior a la tensió de referència, però menor que la que s'obté amb la connexió de dos pickups en sèrie.

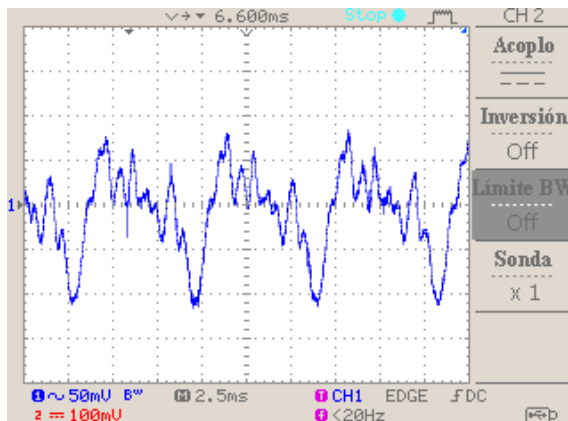


Figura 44. Tensió de sortida per al pickup del màstil.

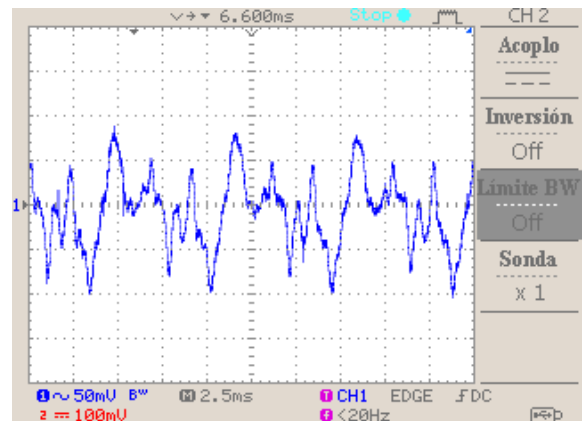


Figura 45. Tensió de sortida per al pickup del mig.

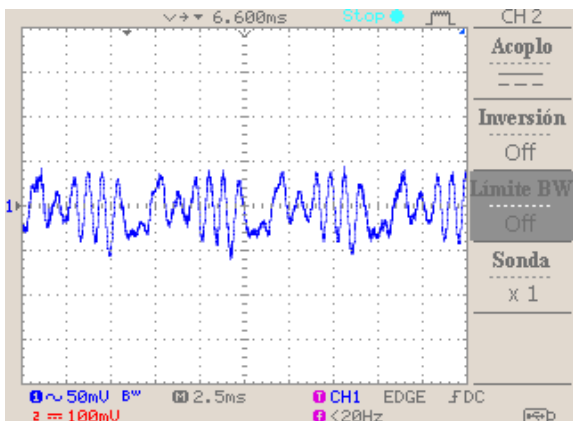


Figura 46. Tensió de sortida per al pickup del pont.

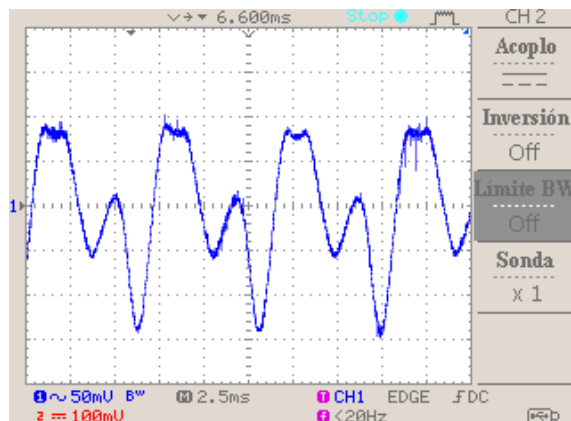


Figura 47. Tensió de sortida per als pickups del màstil i mig en sèrie.

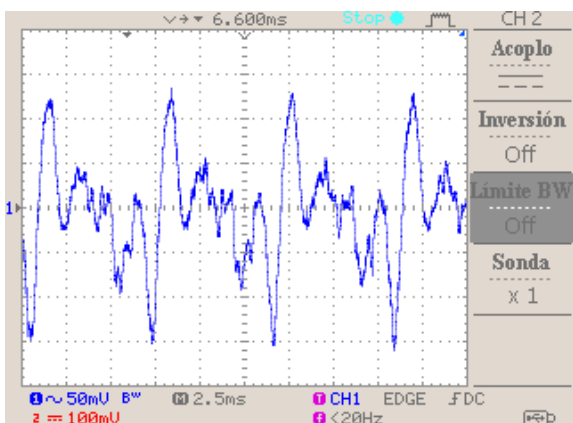


Figura 48. Tensió de sortida per als pickups del mig i pont en sèrie.

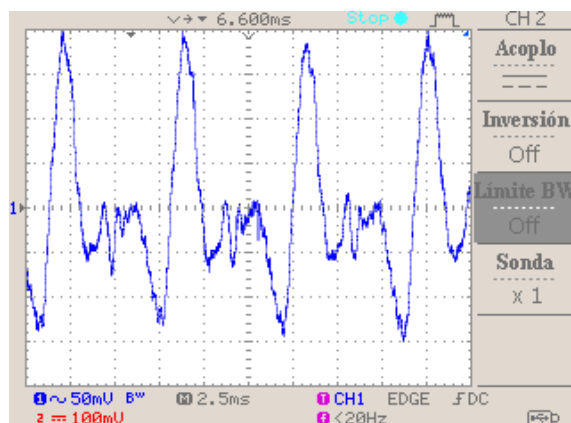


Figura 49. Tensió de sortida per a tots els pickups en sèrie.

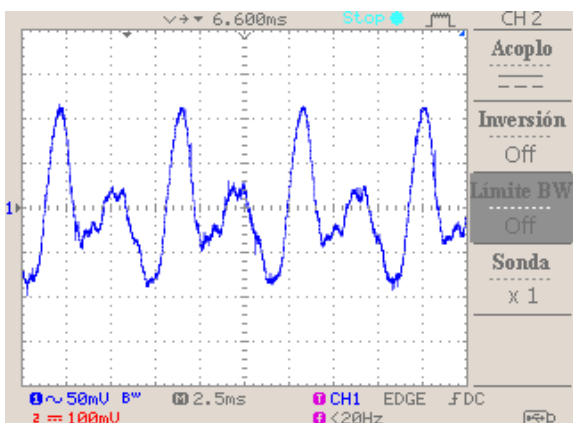


Figura 50. Tensió de sortida per als pickups del màstil i mig en paral·lel.

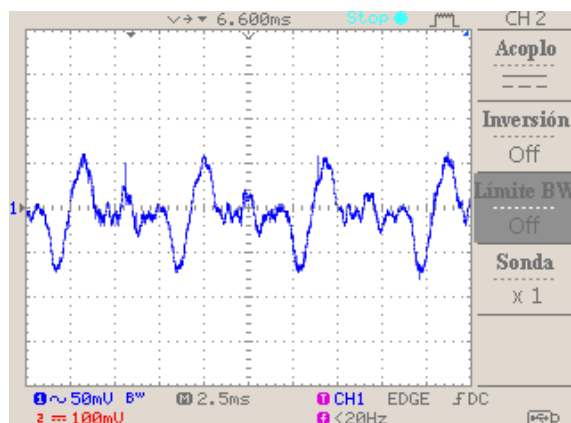


Figura 51. Tensió de sortida per als pickups del mig i pont en paral·lel.

A les figures 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50 i 51 s'observen les tensions de sortida per a diferents combinacions de *pickups* quan es pinça la quarta corda. Cal destacar el rang de diferents tensions que es pot aconseguir combinant un, dos o tres *pickups* en sèrie.

4.2.2. Compressor

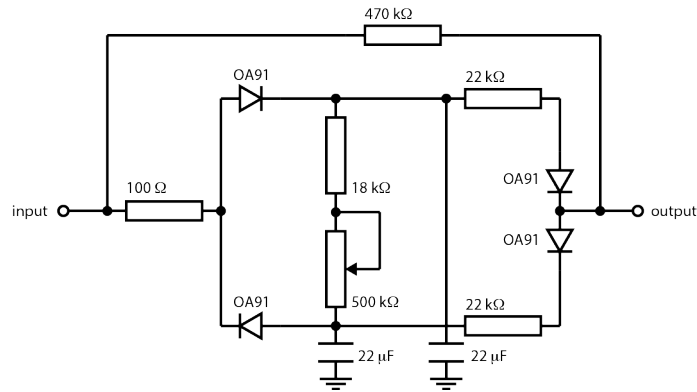


Figura 52. Circuit d'un compressor passiu.

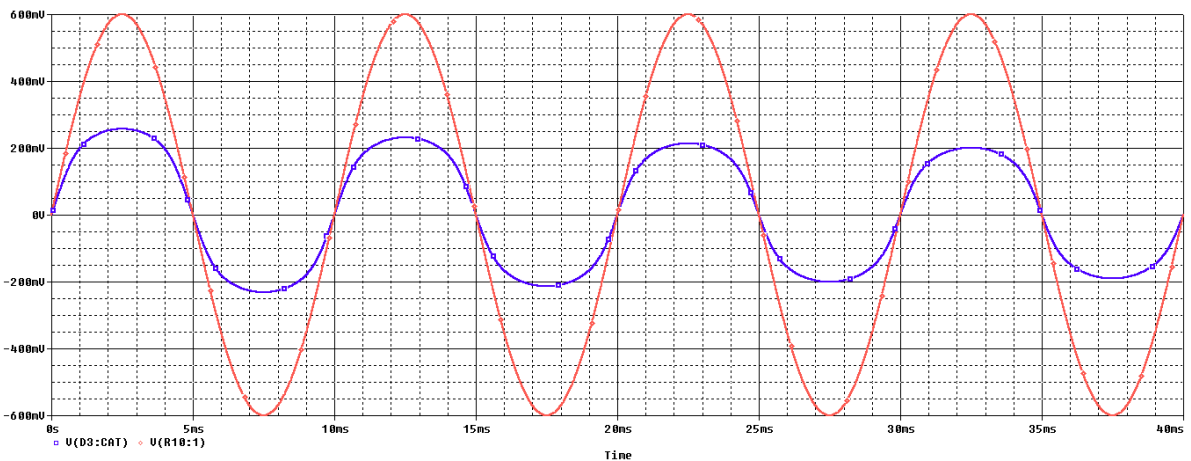


Figura 53. Tensió d'entrada (vermell) i tensió de sortida (blau) del compressor passiu.

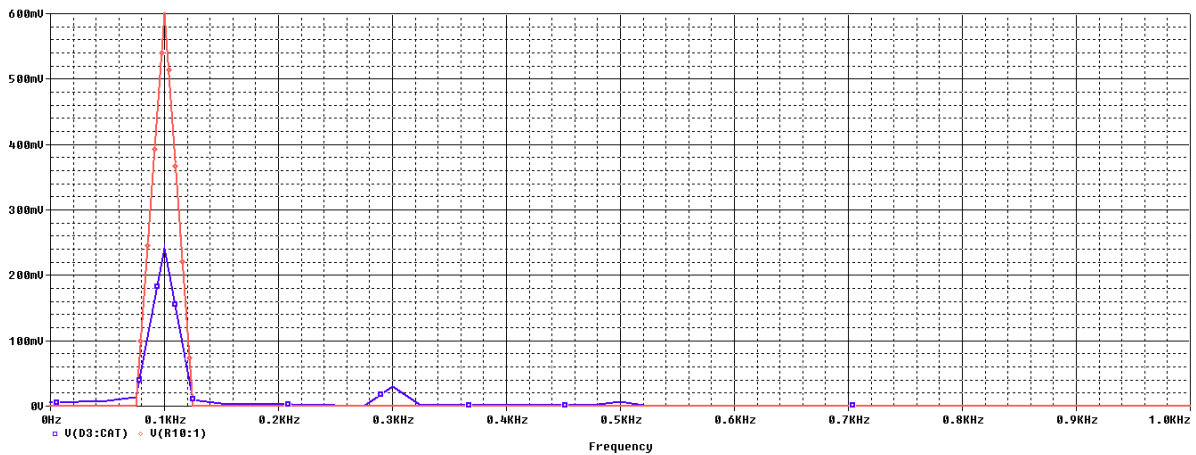


Figura 54. Espectre freqüencial de la tensió d'entrada (vermell) i de la tensió de sortida (blau) del compressor passiu.

Un compressor és un circuit que té la missió de normalitzar el volum d'un senyal. Això vol dir que quan el senyal té massa volum l'ha de baixar i quan en té massa poc, l'ha de potenciar. És un circuit molt utilitzat en àudio i sobretot pels guitarristes, ja que ajuda a tenir un volum molt més uniforme. Els compressors més utilitzats són circuits actius, normalment amb amplificadors operacionals. Però per aquest projecte s'ha utilitzat el compressor passiu de la figura 52. Al ser un circuit passiu no presenta la possibilitat d'amplificar un senyal, però sí de disminuir el seu volum.

A la figura 53 hi ha una comparació entre el senyal d'entrada (senyal vermell) i el de sortida (senyal verd). I a la figura 54 hi ha una comparació dels espectres dels senyals d'entrada i sortida del compressor. En l cas de l'entrada, s'observa un sol harmònic, ja que es tracta d'un senyal sinusoidal. Però en el cas de la sortida es pot observar com el compressor afegeix harmònics a l'espectre, concretament, es tracta d'harmònics senars. Els harmònics senars fan disminuir l'amplitud del pic de la sinusoidal, d'aquí la forma arrodonida del senyal de sortida.

$$x(t) = A \cdot \sin(\omega t) \tag{4}$$

L'equació 4 representa el senyal d'entrada aplicat al compressor, una funció sinusoidal.

$$y(t) = A_1 \cdot \sin(\omega t) + A_3 \cdot \sin(3\omega t) + A_5 \cdot \sin(5\omega t) + \dots \tag{5}$$

A l'equació 5 hi ha representada la funció del senyal de sortida del compressor passiu. Es tracta de una nova sinusoidal amb amplitud diferent a la que se li sumen harmònics senars amb les seves corresponents amplituds. L'amplitud de l'harmònic fonamental i de la resta d'harmònics del senyal de sortida depenen de l'amplitud del senyal d'entrada.

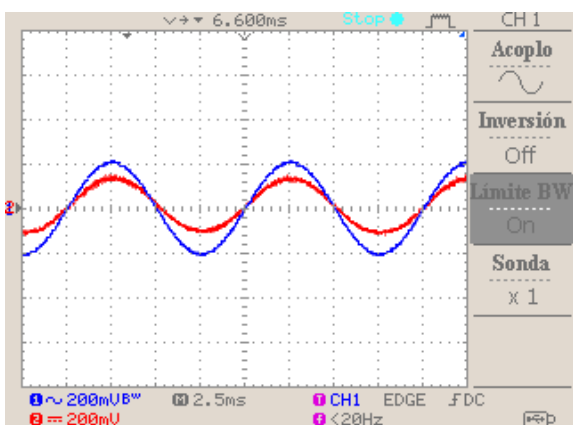


Figura 55. Tensió d'entrada de 200 mV (blau) i sortida (vermell) del compressor amb díodes de silici 1N4148.

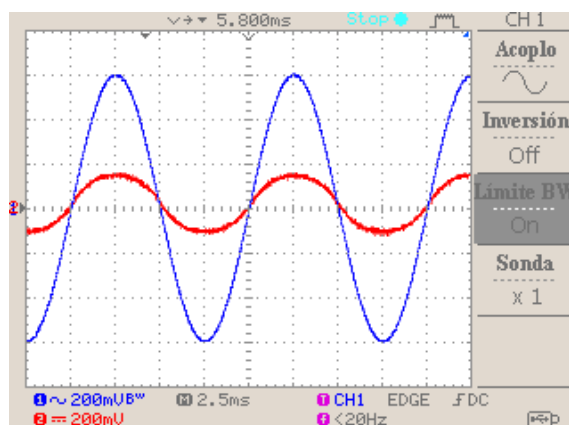


Figura 56. Tensió d'entrada de 600 mV (blau) i sortida (vermell) del compressor amb díodes de silici 1N4148.

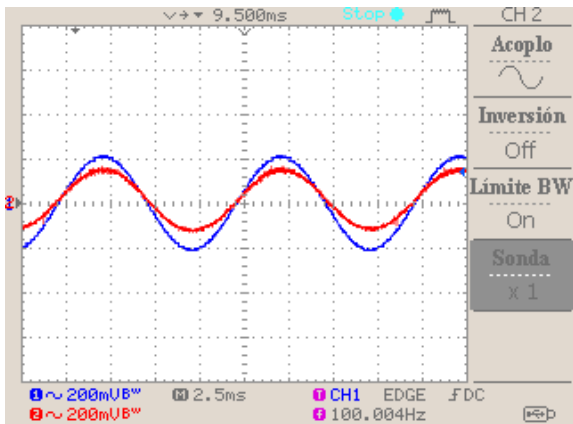


Figura 57. Tensió d'entrada de 200 mV (blau) i sortida (vermell) del compressor amb díodes de germani OA91.

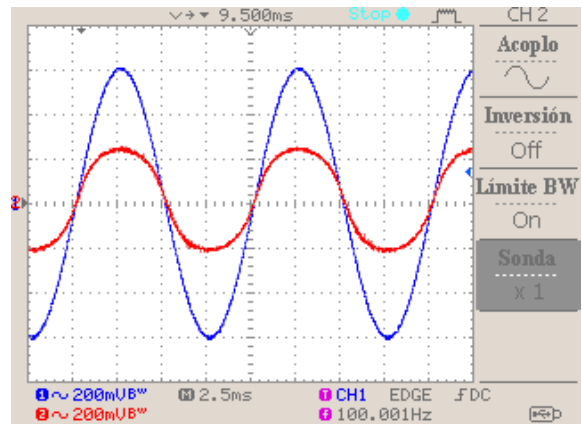


Figura 58. Tensió d'entrada de 600 mV (blau) i sortida (vermell) del compressor amb díodes de germani OA91.

A les figures 55, 56, 57 i 58 es poden observar els resultats de provar el compressor amb diferents tecnologies pel que fa als díodes.

4.2.3. Distorsió

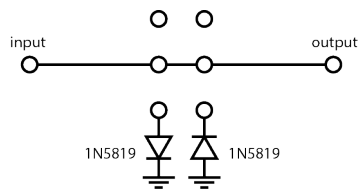


Figura 59. Circuit de distorsió.

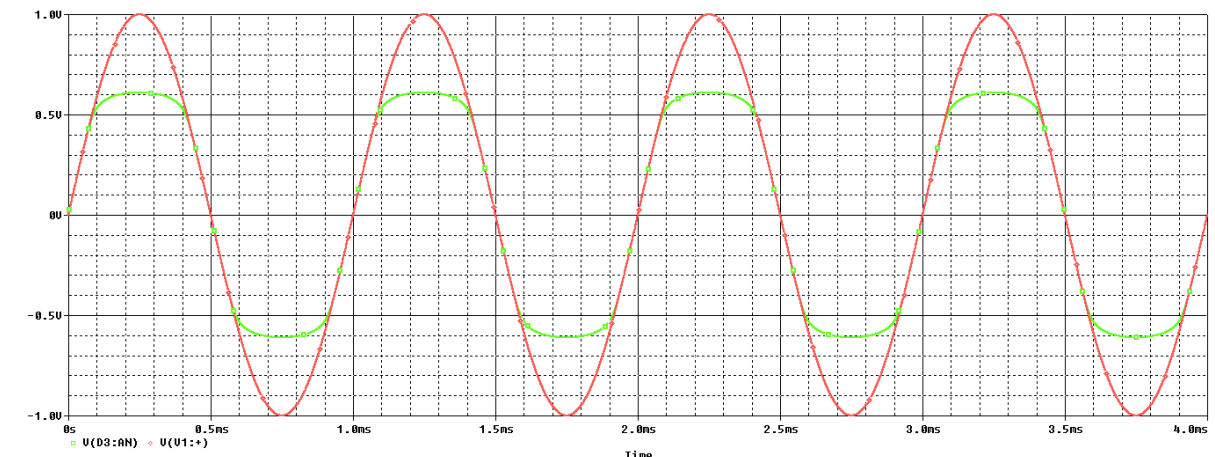


Figura 60. Tensió abans (senyal vermell) i després (senyal verd) de la distorsió.

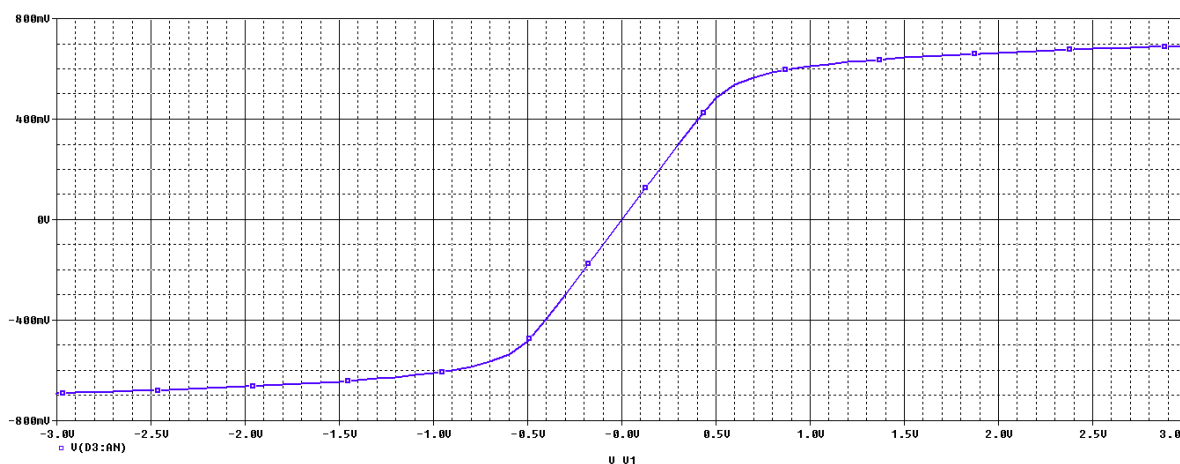


Figura 61. Guany de la distorsió.

L'efecte més conegut i utilitzat pels guitarristes és la distorsió. La distorsió, també anomenada *fuzz*, *distortion* o *overdrive* en anglès, consisteix en retallar el senyal. Aquest efecte es va descobrir en el món de la guitarra a mitjans del segle XX quan els guitarristes pujaven molt el volum dels seus amplificadors de vàlvules de buit i aquests entraven en zona de saturació. Això produeix que el senyal quedi retallat (*clipping*) i aquest fet produeix harmònics senars que conformen el tan característic so de guitarra tan utilitzat en estils com el *rock*.

La manera d'aconseguir aquest efecte amb un circuit actiu passa per saturar un amplificador, ja sigui de vàlvules, transistors o operacional. En canvi, per fer-ho de forma passiva s'han d'utilitzar díodes. Depenent de la tensió llindar del díode i de la magnitud del senyal que es vol retallar, l'efecte resultant serà més intens o menys.

A la figura 59 es pot observar el circuit que forma aquest efecte de forma passiva. S'utilitzen dos díodes en antiparal·lel de manera que es puguin retallar tan els semiperíodes positius com negatius del senyal. El circuit incorpora també un interruptor DPDT per tal de poder activar o desactivar l'efecte quan el guitarrista ho consideri oportú.

A la figura 60 es pot observar el senyal abans (senyal vermell) i després (senyal verd) de l'efecte. I a la figura 61 es pot observar el guany que presenta aquest circuit, cal destacar que al ser un circuit passiu, el guany sempre serà inferior a la unitat.

$$y(x(t)) = \begin{cases} x(t) & \text{si } -V_d < x < V_d \\ V_d & \text{si } -V_d > x > V_d \end{cases} \quad (6)$$

El comportament d'aquest efecte es pot interpretar com una funció per trams. L'equació 6 representa aquest comportament, on $x(t)$ és el senyal d'entrada, $y(x(t))$ és el senyal de sortida, que és funció del senyal d'entrada, i V_d és la tensió llindar dels díodes. Com es pot observar, mentre la tensió d'entrada es

troba entre els llindars dels díodes no es troba afectada, en canvi, quan la tensió d'entrada supera aquesta tensió llindar, la tensió de sortida pren el valor d'aquest llindar.

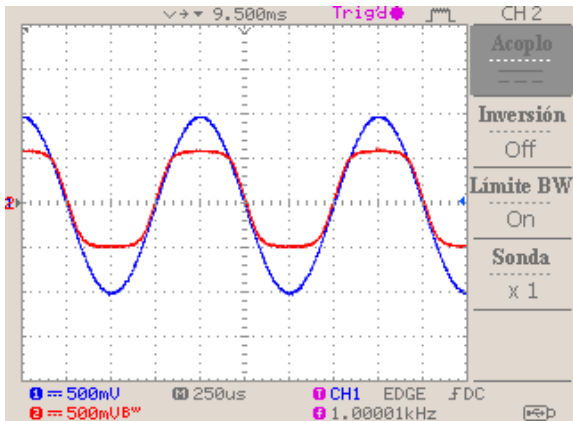


Figura 62. Tensió d'entrada de 1 V (blau) i sortida (vermell) de la distorsió amb díodes de silici 1N4148.

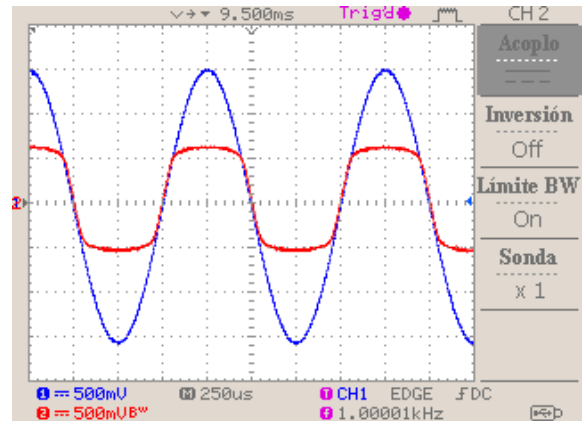


Figura 63. Tensió d'entrada de 1,5 V (blau) i sortida (vermell) de la distorsió amb díodes de silici 1N4148.

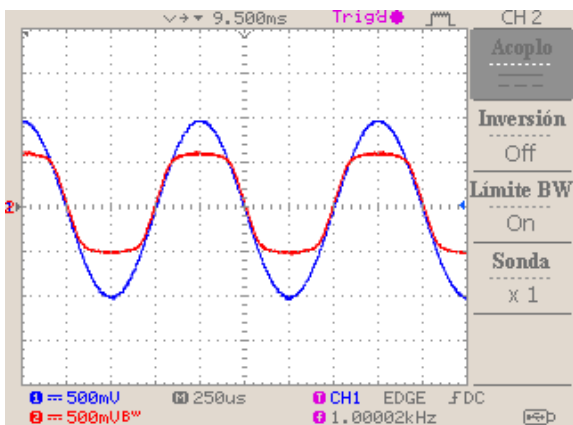


Figura 64. Tensió d'entrada de 1 V (blau) i sortida (vermell) de la distorsió amb díodes de germani OA91.

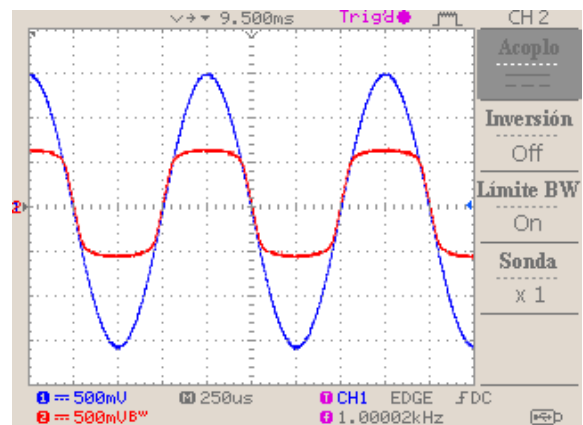


Figura 65. Tensió d'entrada de 1,5 V (blau) i sortida (vermell) de la distorsió amb díodes de germani OA91.

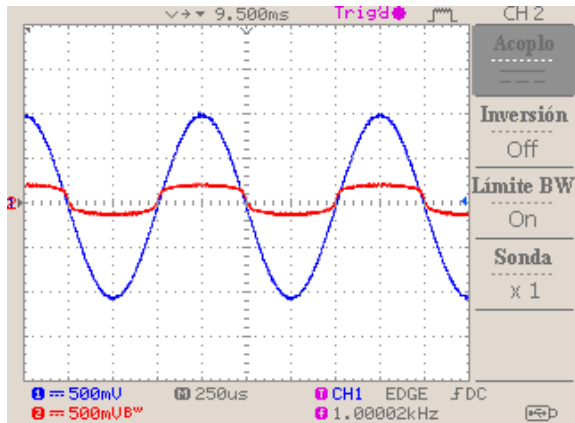


Figura 66. Tensió d'entrada de 1 V (blau) i sortida (vermell) de la distorsió amb díodes schottky 1N5819.

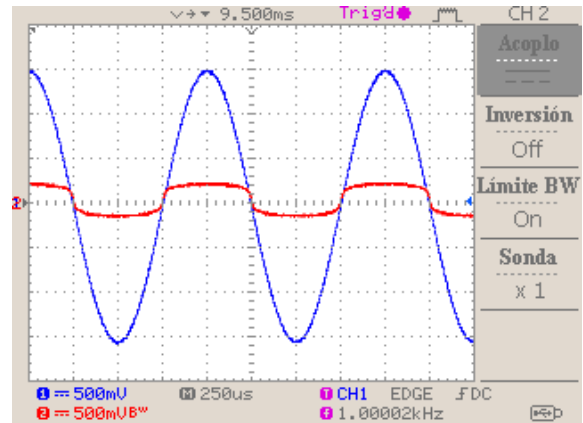


Figura 67. Tensió d'entrada de 1,5 V (blau) i sortida (vermell) de la distorsió amb díodes de schottky 1N5819.

A les figures 62, 63, 64, 65, 66 i 67 es poden observar els resultats de provar la distorsió amb diferents tecnologies pel que fa als díodes. El model de díode que presenta una tensió llindar menor és el 1N5819 (aproximadament 200 mV) i ha estat l'escollit per implementar en el prototip degut a que amb la tensió que proporcionen els *pickups* és possible superar aquest llindar.

4.2.4. Condensadors

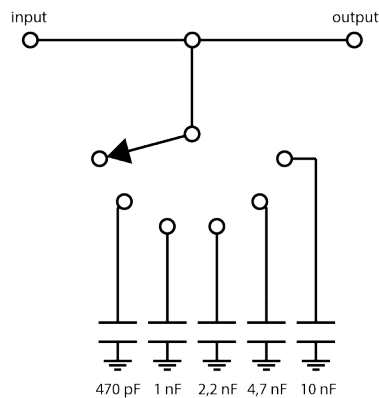


Figura 68. Condensadors per esser connectats en paral·lel amb el pickup.

$$H(s) = \frac{1}{L(C+C_{ad})s^2 + R(C+C_{ad})s + 1} \quad (7)$$

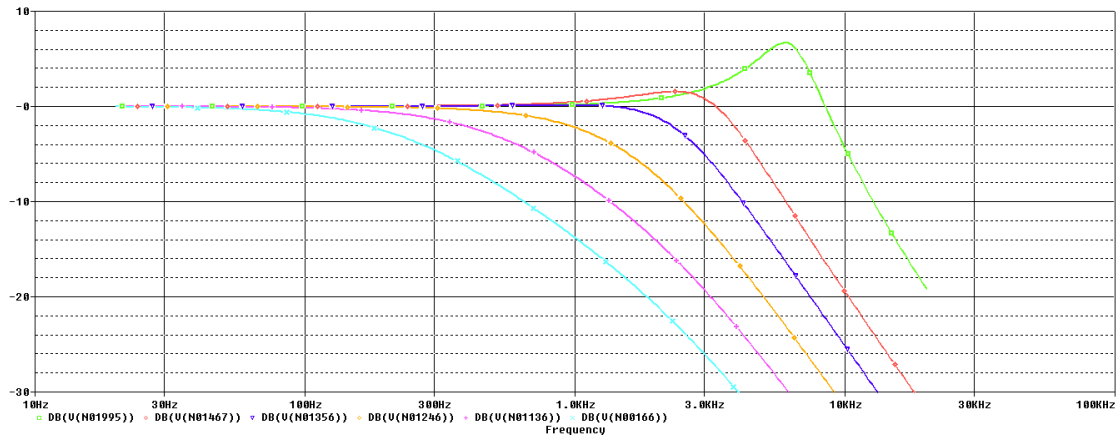


Figura 69. Corbes de resposta freqüencial del pickup en funció del condensador que es selecciona.

Com s'ha explicat anteriorment, una de les coses que determina la resposta freqüencial d'un *pickup*, és la capacitat paràsita del bobinat. Aquesta capacitat no es pot disminuir, ja que és deguda a la construcció del propi *pickup*, però sí que es pot augmentar. Connectant condensadors en paral·lel, en forma de càrrega, es pot modificar la resposta freqüencial final de la guitarra. Diferents valors de capacitat, resultaran en diferents respostes freqüencials.

Per tan de poder triar la major o menor mesura en que es modifica la resposta freqüencial, s'ha incorporat a la guitarra un selector de sis posicions. D'aquesta manera es pot triar entre no connectar cap condensador addicional i cinc valors diferents de capacitat. A la figura 68 es pot observar el circuit necessari.

L'equació 7 representa la funció de transferència d'un *pickup* més un condensador addicional en paral·lel (C_{ad}).

A la figura 69 hi ha representades les diferents respostes freqüencials que es poden obtenir fent ús de cada un dels cinc condensadors. A continuació es descriu la correspondència entre colors de les corbes i valors dels condensadors seleccionats.

- Verd: sense condensador
- Vermell: 470 pF
- Blau: 1 nF
- Taronja: 2,2 nF
- Rosa: 4,7 nF
- Cian: 10 nF

Com s'ha pogut observar, a mesura que es va augmentant el valor de la capacitat, disminueix la presència d'aguts al so final de la guitarra.

4.2.5. Filtres rebutja-banda. Varitone

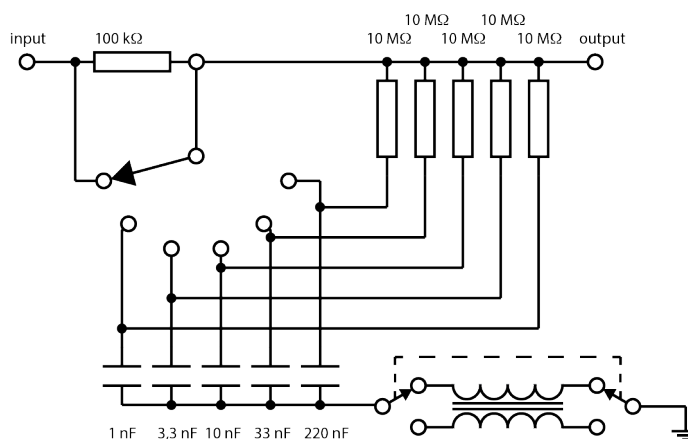


Figura 70. Circuit de Varitone.

$$H(s) = k \frac{1 + \left(\frac{s}{\omega_0}\right)^2}{\left(\frac{s}{\omega_0}\right)^2 + \frac{1}{Q} \frac{s}{\omega_0} + 1} = \frac{1 + CLs^2}{CLs^2 + RCs + 1} \quad (8)$$

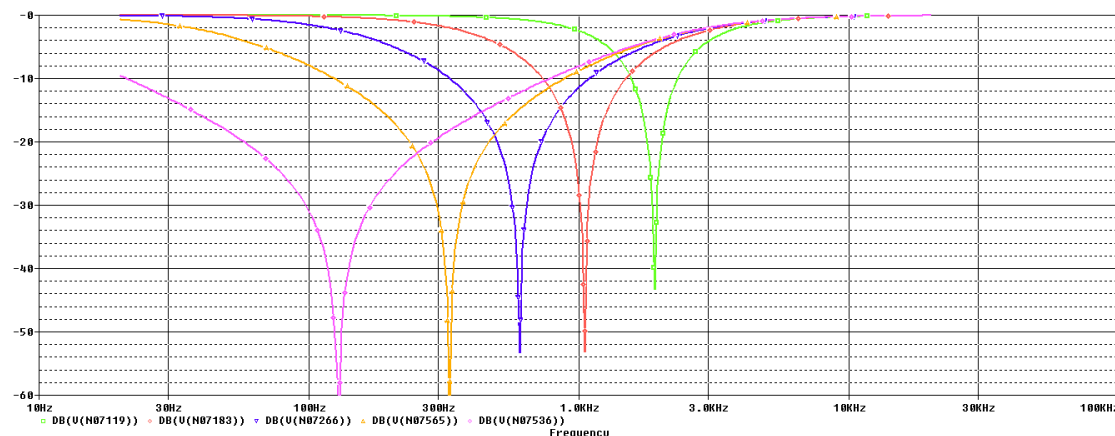


Figura 71. Corbes de resposta freqüencial del Varitone en funció de la posició de l'interruptor de sis posicions.

Aquest circuit, anomenat comercialment com a *Varitone*, va ser inclòs en alguns models antics de *Gibson*. Es tracta de filtres rebutja-banda. Mitjançant una resistència, un condensador i una inductància es conforma un filtre que elimina una determinada freqüència de l'espectre resultant de la guitarra. Amb un selector es pot canviar entre diferents condensadors de diferents capacitats per tal de modificar la freqüència que es elimina.

A la figura 70 hi ha representat el circuit que s'ha implementat a la guitarra. Amb un selector de sis posicions es pot triar entre realitzar un *bypass* a l'efecte, és a dir que no actuï, i cinc valors de capacitat diferents. Per a implementar la inductància s'ha utilitzat un petit transformador per a aplicacions d'àudio. Ja que

el transformador disposa de dos bobinats s'ha fet ús d'un interruptor DPDT per tal de poder seleccionar si es connecta el primari o el secundari.

L'equació 8 compara la funció estàndard general d'un filtre rebutja-banda amb la funció de transferència amb components electrònics d'aquest filtre.

A la figura 71 hi ha representades les diferents corbes que corresponen a la resposta freqüencial resultant de connectar els diferents condensadors. Per a realitzar la simulació s'ha fixat un valor per a la inductància de 7 H. A continuació s'indica la correspondència entre el color de les corbes i els valors de la capacitat del condensadors que s'han connectat.

- Verd: 1 nF
- Vermell: 3,3 nF
- Blau: 10 nF
- Taronja: 33 nF
- Rosa: 220 nF

4.2.6. Control de to

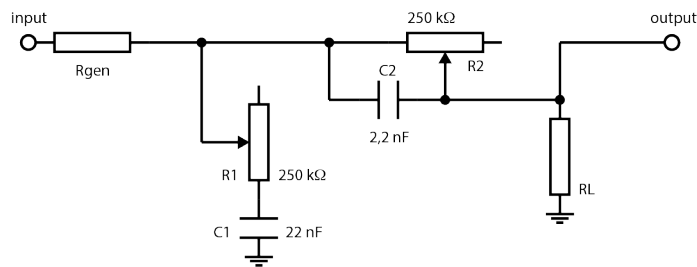


Figura 72. Control de to amb greus i aguts.

$$H(s) = \frac{R_1 C_1 s + 1}{(R_1 + R_{gen}) C_1 s + 1} \cdot \frac{R_2 C_2 s + 1}{R_2 C_2 s + \frac{R_2}{R_L} + 1} \quad (9)$$

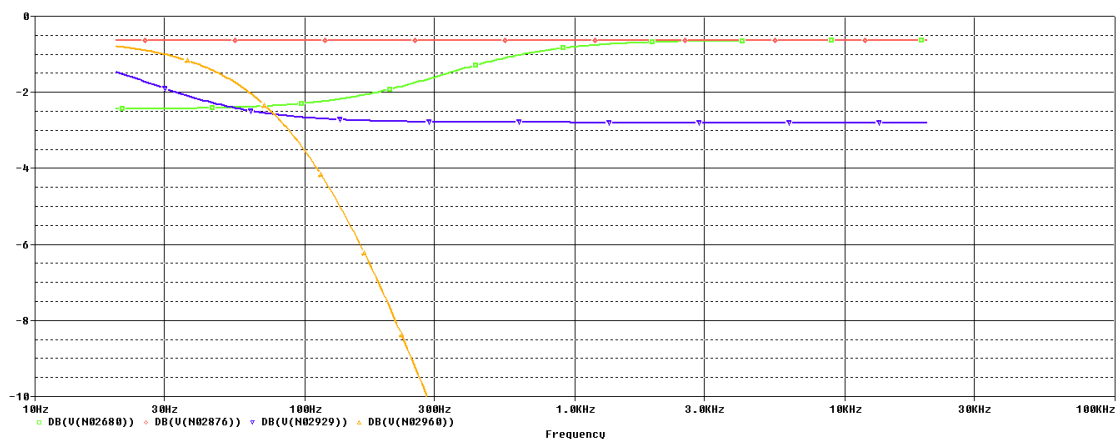


Figura 73. Corbes de resposta freqüencial de cada un dels controls de to per a diferents posicions dels potenciòmetres.

Gairebé totes les guitarres del mercat incorporen un control de to. Aquest control de to sempre consisteix en un filtre passa-baixos, de manera que l'únic que es pot fer es reduir la quantitat d'aguts que presenta el so de la guitarra. Ja que la guitarra utilitzada en aquest projecte disposava de dos potenciòmetres de control de to (per a diferents *pickups*), s'ha optat per substituir el filtre passa-baixos d'un d'ells per un filtre passa-alts. D'aquesta manera es pot reduir també la quantitat de greus que presenta el so de la guitarra, encara que no es poden reduir tant com els aguts.

A la figura 72 hi ha representat el circuit que inclou els controls d'aguts i greus implementat a la guitarra. Cal destacar que el condensador que s'utilitza per al filtre passa-alts és deu vegades més petit que el que s'utilitza per al filtre passa-baixos per tal que la freqüència de tall d'aquest sigui menor.

L'equació 9 és la funció de transferència del circuit de control de to de la figura 72. Cal destacar que per tal de que la funció de transferència sigui representativa s'han d'incloure la resistència del *pickup* (R_{gen}) i la resistència de càrrega (R_L).

A la figura 73 s'hi representen les respostes freqüencials de cada un dels dos filtres independentment de l'altre en les seves posicions màxima i mínima. A continuació s'indica la correspondència entre el color de les corbes i la posició de cada un dels controls.

- Verd: greus = 100%
- Vermell: greus = 0
- Blau: aguts = 100%
- Taronja: aguts = 0

4.2.7. Resistències

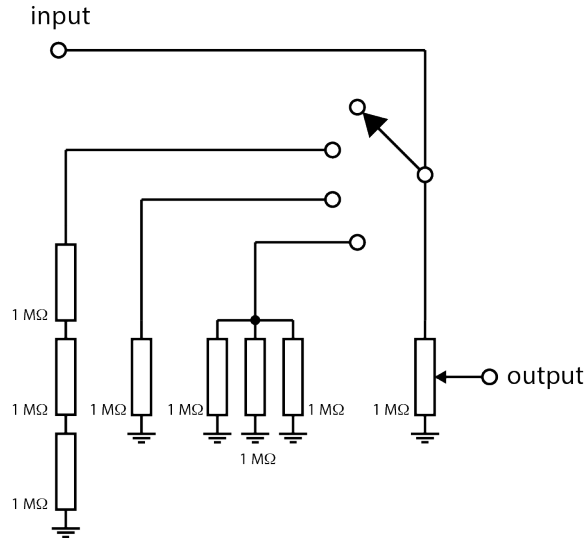


Figura 74. Resistències per a esser connectades en paral·lel amb el potenciòmetre de volum.

$$H(s) = \frac{R_L}{CLR_Ls^2 + (L + RC R_L)s + R + R_L} \quad (10)$$

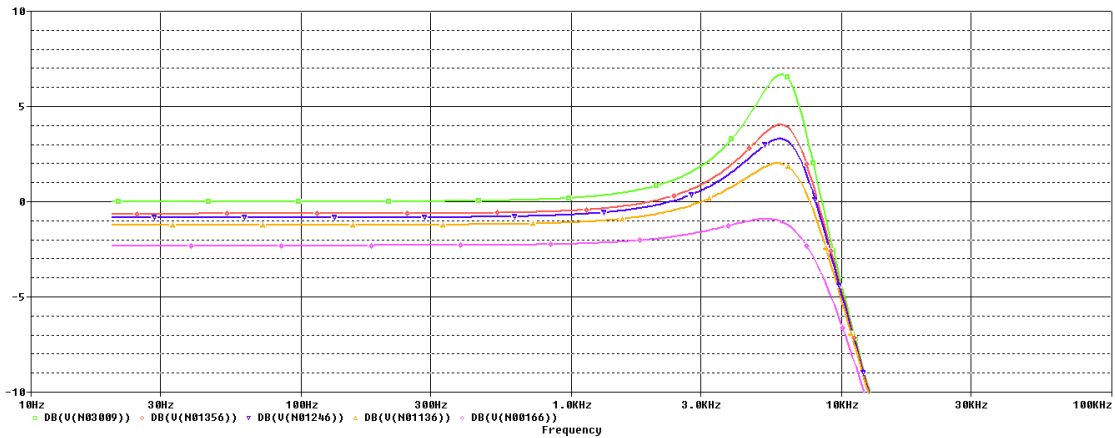


Figura 75. Corbes de resposta freqüencial del pickup en funció de la resistència que es selecciona.

Si una de les maneres de modificar la resposta freqüencial d'un *pickup* és canviant el valor de la càrrega capacitiva, un altre mètode és el de canviar el valor de la càrrega resistiva. Per tal d'aconseguir aquest efecte, s'ha fet servir un selector de quatre posicions per poder seleccionar entre quatre valors de resistència de càrrega.

A la figura 74 hi ha representat el circuit que s'ha implementat per tal d'assolir aquest objectiu. Utilitzant un potenciòmetre de volum de 1 MΩ i la combinació de resistències del mateix valor s'han obtingut valors de càrrega resistiva resultants de 250 kΩ, 500 kΩ, 750 kΩ i 1 MΩ.

L'equació 10 representa la funció de transferència d'un *pickup* més una resistència de càrrega (R_L).

A la figura 75 hi ha representades les diferents respostes freqüencials que es poden obtenir amb els diferents valors de càrrega resistiva. A continuació s'indica la correspondència entre el color de les corbes i els valors de càrrega resistiva que es poden obtenir.

- Verd: sense càrrega
- Vermell: 1 M Ω
- Blau: 750 k Ω
- Taronja: 500 k Ω
- Rosa: 250 k Ω

Com es pot observar, es pot aconseguir emular els valors típics per al potenciòmetre de volum que presenten els models comercials de guitarres. Cal destacar que a aquesta càrrega resistiva se l'hi ha d'afegir, com a mínim, la impedància d'entrada de l'amplificador al qual es connecti la guitarra. Amb això i observant la figura 75 es pot deduir que una guitarra amb un potenciòmetre de 250 k Ω connectada a un amplificador difícilment podrà mantenir el pic de ressonància característic d'un *pickup*.

4.3. Altres modificacions possibles

4.3.1. Equalització

Una eina molt útil en el món de l'àudio són els equalitzadors. Un equalitzador és un conjunt de filtres passa-banda que permeten potenciar o atenuar determinades freqüències de l'espectre audible. Per norma general, els equalitzadors són circuits actius amb amplificadors operacionals, però es poden implementar de forma passiva. El problema que tenen els equalitzadors a l'hora d'implementar-se de forma passiva és el factor de qualitat dels filtres passa-banda. Com més bandes es vulgui disposar en un equalitzador, més selectius han de ser cada un dels filtres, ja que si no es produeixen solapaments i no es pot assolir un comportament independent de cada una de les bandes. Si es vol implementar un equalitzador de més de tres bandes (el més habitual en amplificadors de guitarra), el factor de qualitat que han d'assolir els filtres fa que la quantitat de components passius augmenti de forma considerable. L'augment considerable de nombre de components (condensadors i inductàncies) fa que sigui poc viable implementar equalitzadors amb circuiteria passiva dins els cos d'una guitarra.

4.3.2. Control de to de tres bandes. Tone Stack

Els amplificadors de guitarra, normalment, incorporen un senzill equalitzador de tres bandes. Aquest equalitzador es pot ajustar mitjançant tres potenciòmetres que porten el nom de greus, mitjos i aguts. En la majoria d'amplificadors de vàlvules (tecnologia molt habitual en els amplificadors de guitarra) aquest equalitzador s'implementa de forma passiva, per tant, esdevé una bona opció per a ser implementat directament a la guitarra i així tenir un control més accessible. Habitualment aquest circuit d'equalització que incorporen els amplificadors s'anomena *Tone Stack* i a continuació es fa un petit estudi del seu comportament.

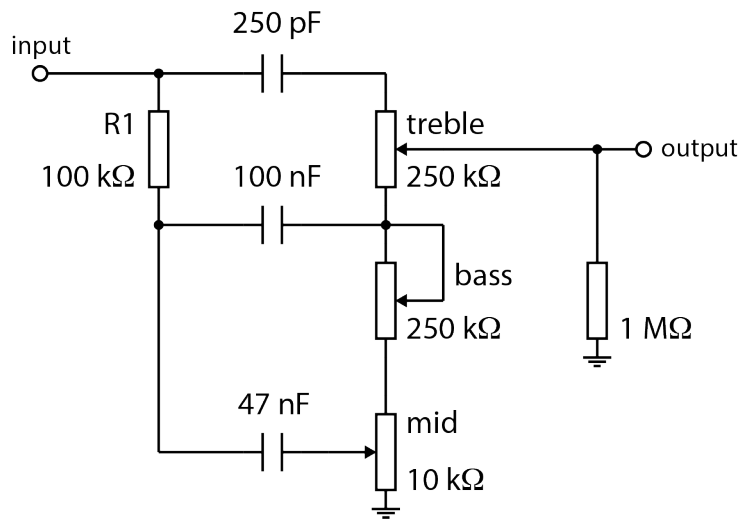


Figura 76. Circuit de Tone Stack.

Per tal de poder observar el comportament de cada un dels controls per separat s'ha simulat la variació de cada un d'ells mantenint els altres controls al 100% del seu valor.

- Control de greus

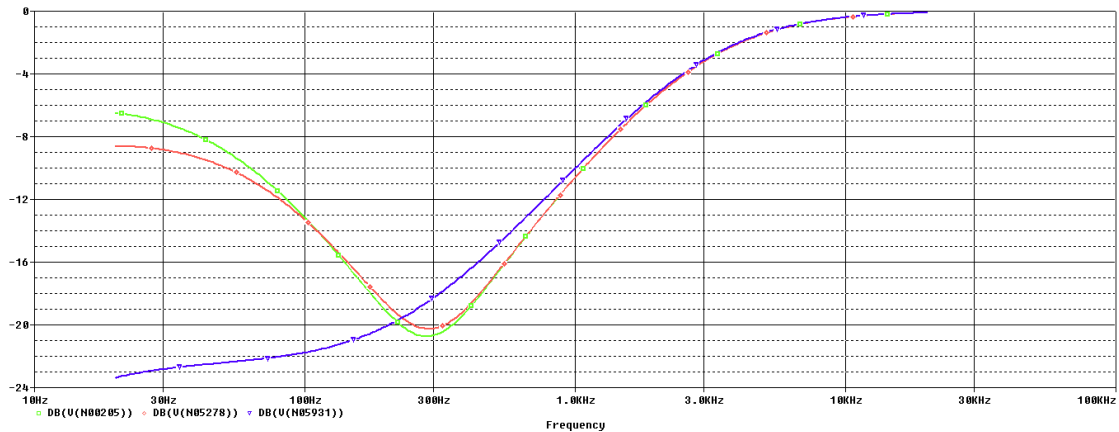


Figura 77. Corbes de resposta freqüencial per a diferents posicions del potenciòmetre de greus.

A continuació s'indica la correspondència entre el color de les corbes de la figura 77 i la posició del potenciòmetre.

- Verd: greus = 100%
- Vermell: greus = 50%
- Blau: greus = 0%

A la figura 77 es pot observar la variació que produeix el potenciòmetre de greus a la resposta freqüencial del *Tone Stack*. Cal destacar que aquest circuit no permet una resposta plana o uniforme. Es pot observar com al modificar el valor del potenciòmetre de greus també es veu alterada la zona de mitjos.

- Control de mitjos

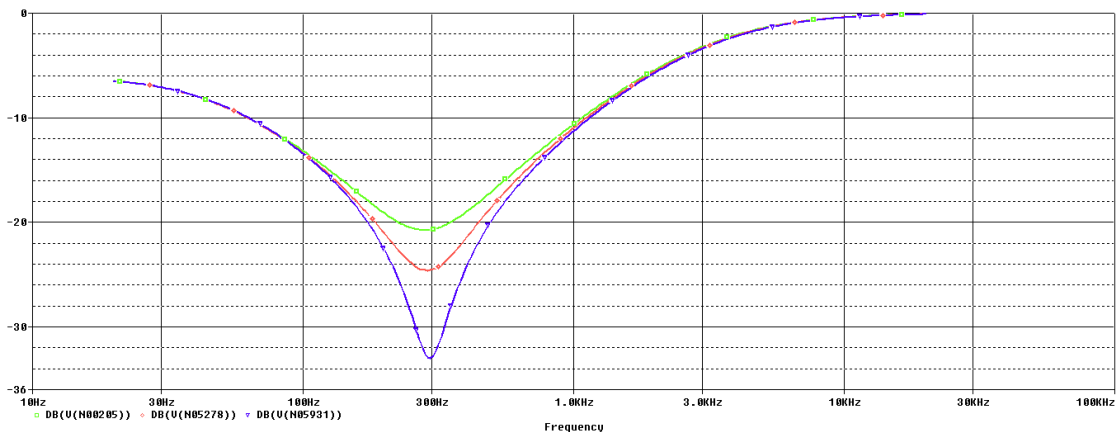


Figura 78. Corbes de resposta freqüencial per a diferents posicions del potenciòmetre de mitjos.

A continuació s'indica la correspondència entre el color de les corbes de la figura 78 i la posició del potenciòmetre.

- Verd: mitjos = 100%
- Vermell: mitjos = 50%
- Blau: mitjos = 0%

A la figura 78 es pot observar la variació que produeix el potenciòmetre de mitjos a la resposta freqüencial del *Tone Stack*. Aquest control és el més independent dels tres, ja que es pot controlar l'atenuació que es produeix a la freqüència ajustada pel valor dels components sense alterar l'atenuació que es produeix a les altres bandes.

- Control d'aguts

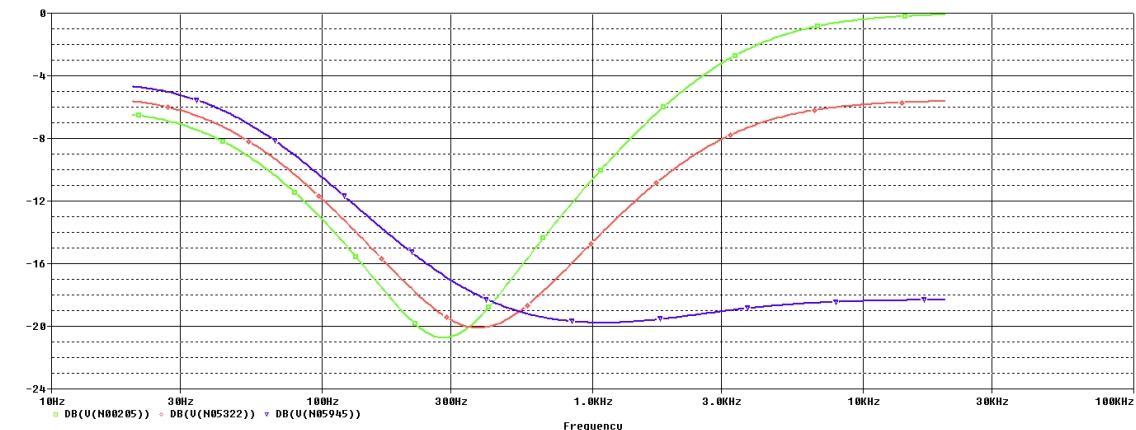


Figura 79. Corbes de resposta freqüencial per a diferents posicions del potenciòmetre d'aguts.

A continuació s'indica la correspondència entre el color de les corbes de la figura 79 i la posició del potenciòmetre.

- Verd: aguts = 100%
- Vermell: aguts = 50%
- Blau: aguts = 0%

A la figura 79 es pot observar la variació que produeix el potenciòmetre d'aguts a la resposta freqüencial del *Tone Stack*. Aquest control és el menys independent de tots, ja que es poden observar variacions en el nivell de greus i d'aguts a mesura que es varia el potenciòmetre d'aguts.

- Tots els controls

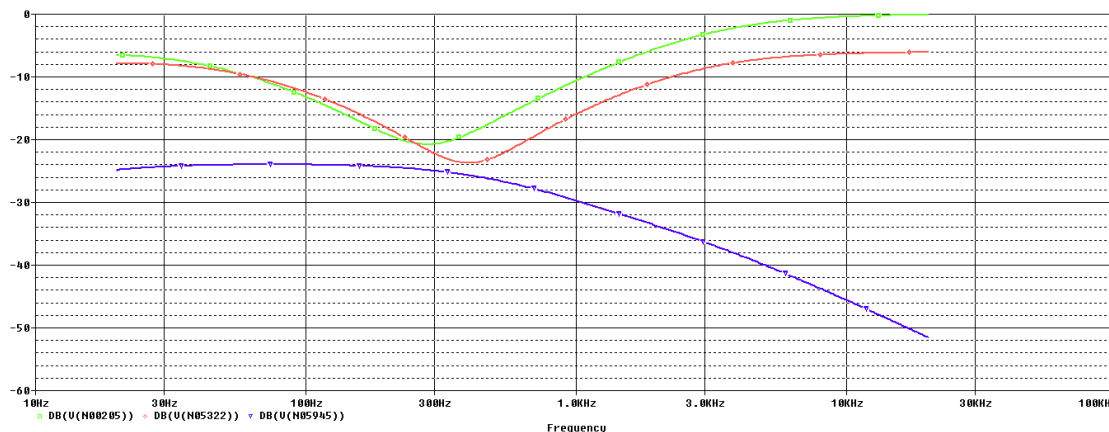


Figura 80. Corbes de resposta freqüencial per a diferents posicions de tots els potenciòmetres.

A continuació s'indica la correspondència entre el color de les corbes de la figura 80 i les posicions de tots els potenciòmetres.

- Verd: tots = 100%
- Vermell: tots = 50%
- Blau: tots = 0%

A la figura 80 es pot observar la variació que produeixen tots potenciòmetres a la resposta freqüencial del *Tone Stack*. Cal destacar que la quantitat d'atenuació que produeix cada un d'ells és diferent.

- Resistència R1

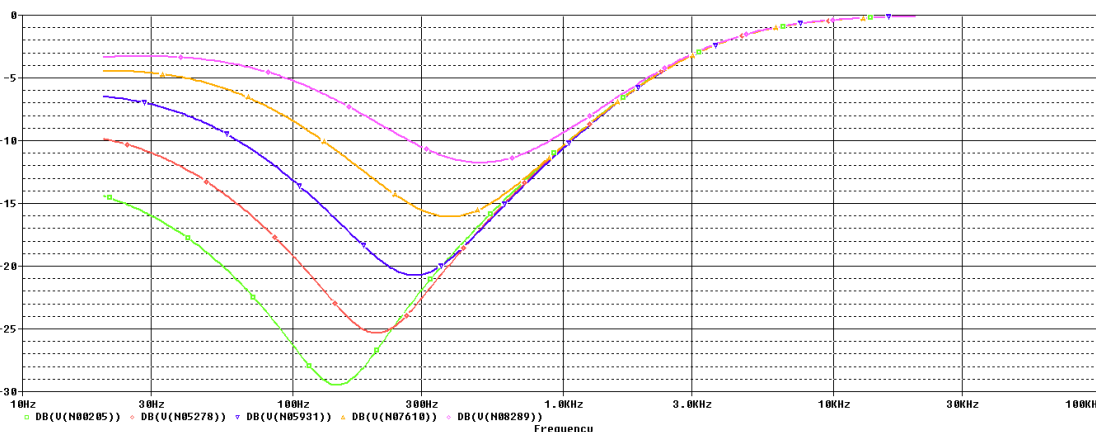


Figura 81. Corbes de resposta freqüencial per a diferents valors de la resistència R1.

A continuació s'indica la correspondència entre el color de les corbes de la figura 81 i el valor de la resistència R1.

- Verd: R1 = 400 kΩ
- Vermell: R1 = 200 kΩ
- Blau: R1 = 100 kΩ
- Taronja: R1 = 50 kΩ
- Rosa: R1 = 25 kΩ

Per acabar, a la figura 81 es pot observar la variació que produeix el valor de la resistència R1 a la resposta freqüencial del *Tone Stack*. Aquesta resistència no té cap efecte sobre les freqüències agudes però sí sobre l'atenuació que es produeix en mitjos i greus. També es pot observar com modifica la freqüència on es produeix el vall d'atenuació màxima dels mitjos.

4.3.3. Grease Bucket

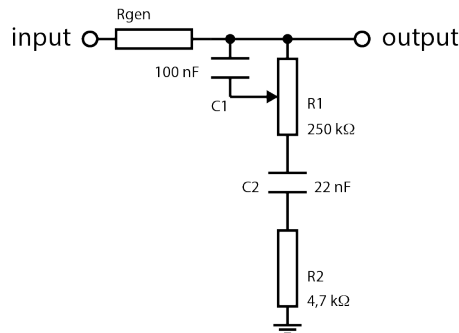


Figura 82. Circuit de Grease Bucket.

$$H(s) = \frac{(R_1 + R_2)C_2 s + 1}{(R_{gen} + R_1 + R_2)C_2 s + 1} \quad (11)$$

$$H(s) = \frac{R_1 C_1 R_2 C_2 s^2 + (R_1 (C_1 + C_2) + R_2 C_2) s + 1}{(R_2 + R_{gen}) R_1 C_1 C_2 s^2 + (R_1 (C_1 + C_2) + C_2 (R_2 + R_{gen})) s + 1} \quad (12)$$

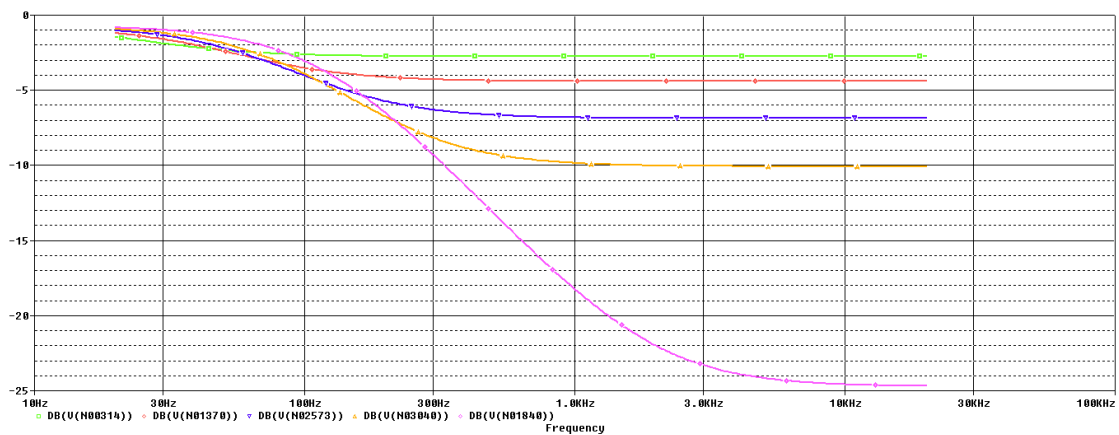


Figura 83. Corbes de resposta freqüencial per a diferents posicions del potenciòmetre del Grease Bucket.

El *Grease Bucket* és un control de to alternatiu dissenyat per *Fender*. El van incloure en alguns models de guitarra per fer una distinció. Presenta una resposta freqüencial diferent del control de to clàssic.

L'equació 11 representa la funció de transferència del *Grease Bucket* quan el potenciòmetre es troba a la posició 100% (C_1 curtcircuitat) i l'equació 12 representa la funció de transferència a la posició 0% del potenciòmetre.

A la figura 83 es poden observar diferents corbes per a diferents posicions del potenciòmetre que ajusta aquest control de to. A continuació s'indica la correspondència entre el color de les corbes de la figura 83 i la posició del potenciòmetre.

- Verd: 100%
- Vermell: 50%
- Blau: 25%
- Taronja: 12,5%
- Rosa: 0

4.3.4. Treblebleed

Una de les coses que molesta molt als guitarristes del control de volum de les seves guitarres és que al baixar-lo es produeix una reducció d'aguts i el so perd brillantor. Aquest problema té una solució molt senzilla, que implica tan sols d'afegir un condensador al circuit.

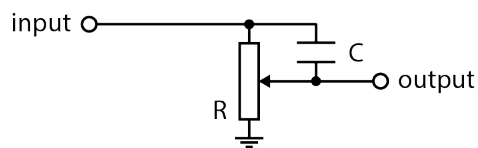


Figura 84. Circuit de Treblebleed.

$$H(s) = \frac{(1-\alpha)\alpha R^2 Cs + R\alpha}{(1-\alpha)\alpha R^2 Cs + R} \quad (13)$$

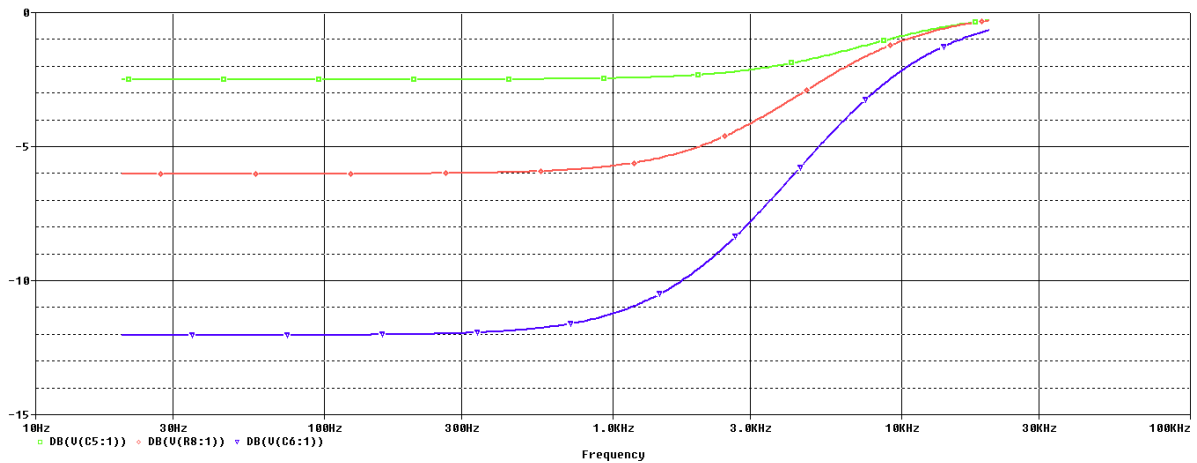


Figura 85. Corbes de resposta freqüencial per a diferents posicions del potenciòmetre de volum amb Treblebleed.

L'equació 13 és la funció de transferència en funció de la posició del potenciòmetre (α).

A la figura 85 es poden observar diferents corbes per a diferents posicions del potenciòmetre de volum amb *Treblebleed*. A continuació s'indica la correspondència entre el color de les corbes de la figura 85 i la posició del potenciòmetre.

- Verd: 75%
- Vermell: 50%
- Blau: 25%

Cal destacar que aquest condensador no té cap efecte quan el potenciòmetre de volum es troba a la posició 100%, ja que queda curtcircuitat. El valor del condensador que es connecta entre el cursor i l'extrem que no està connectat a massa del potenciòmetre de volum variarà en funció de la mesura en la que es vulgui corregir el problema esmentat anteriorment. Un valor habitual és 1 nF.

CAPÍTOL 5: REALITZACIÓ DEL PROTOTIP

5.1. Procés de mecanització

Per tal de poder ubicar tots els nous components electrònics que s'han afegit a la guitarra en aquest projecte, ha estat necessària la modificació de les cavitats que originalment presentava.



Figura 86. Vista frontal de les cavitats de la guitarra.

A la figura 86 es poden observar les cavitats de la part frontal de la guitarra. La cavitat original per als potenciòmetres s'ha ampliat cap a la dreta, ja que és una zona que és tapada pel colpejador. A la part superior dreta s'ha afegit una cavitat per incorporar-hi els interruptors de canvi de fase. La cavitat que s'observa a la part inferior esquerra és on s'ubica el connector jack de 1/4".



Figura 87. Vista posterior de les cavitats de la guitarra.

A la figura 87 es poden observar les cavitats de la part posterior de la guitarra. En aquest cas s'ha inclòs una cavitat que permet introduir els components electrònics des de darrera i que així quedin els botons per la part de davant.

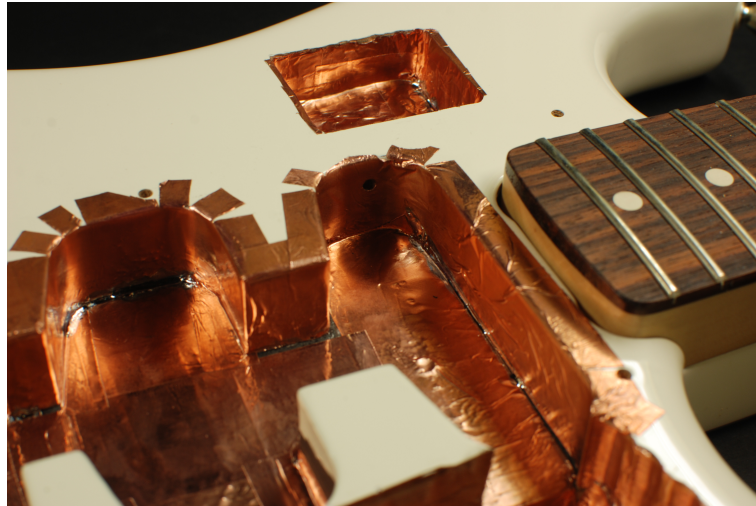


Figura 88. *Detall de l'apantallament de les cavitats.*

Degut a que s'ha afegit molt més cablejat i components dels que incorporava inicialment la guitarra, la susceptibilitat electromagnètica ha augmentat de forma considerable. Per tal que no s'indueixin sorolls no desitjats des de l'exterior de la guitarra s'ha realitzat un apantallament de les cavitats. S'ha utilitzat cinta de coure adhesiva que facilita la seva fixació. Això produeix una gàbia de *Faraday*, que connectant-la a massa evita que s'introdueixin sorolls no agradables.



Figura 89. *Colpejador de la guitarra després de la mecanització.*

Gran part dels controls s'han ubicat al colpejador de la guitarra degut al seu fàcil accés per al guitarrista. A la figura 89 s'observa el colpejador de la guitarra després del procés de mecanització necessari.

5.2. El prototip finalitzat



Figura 90. Vista frontal del prototip



Figura 91. Vista posterior del prototip.

A les figures 90 i 91 es pot observar el prototip acabat. És fàcil veure com ha augmentat el nombre de potenciòmetres i interruptors per tal de poder manejar l'electrònica que s'hi ha afegit. Per la part de darrera s'ha hagut de construir una tapa nova per tal de cobrir una de les cavitats que s'han hagut d'afegir al cos de la guitarra.

CAPÍTOL 6: BIBLIOGRAFIA

6.1. Bibliografía de Consulta

6.1.1. Llibres

Lemme, H. 1987. "Electric Guitar: Sound Secrets and Technology". Elektor.

Jones, M. 1995. "Valve Amplifiers". Newnes.

6.1.2. Articles

Horton, N. Moore, T. 2009. "Modeling the Magnetic Pickup of an Electric Guitar".

Karjalainen, M. Penttinen, H. Välimäki, V. 1999. "More Acoustic Sounding Timbre from Guitar Pickups".

Lemme, H. 2009. "The Secrets of Electric Guitar Pickups".

6.1.3. Webs

Electro Schematics. <http://www.electroschematics.com/138/dynamic-compressor-passive-components-no-power-supply/> (consultat 5 de febrer de 2014).

Fender. <http://www.fender.com> (consultat 5 de febrer de 2014).

Adam's Amps. <http://amps.zugster.net/articles/tonestacks> (consultat 7 de març de 2014).

Schematic Heaven. <http://www.schems.com> (consultat 7 de març de 2014).

Vintage Fender Amp Repair. <http://vintagefenderamprepair.com/schematics/> (consultat 7 de març de 2014).

Pick Roar. <http://pickroar.com/1003/the-tone-stack-explained-in-english-for-humans/> (consultat 15 de març de 2014).

Duncan Amps. <http://www.duncanamps.com/technical/tonestack.html> (consultat 15 de març de 2014).

Classic Tube Amps. <http://www.classictubeamps.com/Tonestack.html> (consultat 15 de març de 2014).

Talk Bass Forum. <http://www.classictubeamps.com/Tonestack.html> (consultat 15 de març de 2014).

Pro Guitar Shop. <https://proguitarshop.com/andyscorner/how-does-your-tone-stack-up> (consultat 15 de març de 2014).