

Amplificació d'àudio en classe D

Pere Ràfols Soler

EPSEVG Juny de 2007

Resum

En aquest document, es planteja un disseny d'un amplificador en classe D. Mentre es va progressant en la descripció de l'amplificador també s'aniran introduint els diferents paràmetres a tenir en compte. El primer punt serà el disseny de l'etapa de potència a partir de la qual caldrà elaborar una tècnica de commutació adequada. Tot seguit s'estudiarà la forma que ha de tenir el controlador. Per tal de realitzar un control de forma acurada es fa us de l'eina Matlab amb la qual podem modelar tot el sistema. Finalment, es reflexionarà sobre el futur d'aquesta tècnica d'amplificació.

1. Introducció

Els amplificadors d'àudio en classe D plantegen una interessant alternativa a les tècniques clàssiques d'amplificació com ara la classe A, B o AB. La classe D és capaç d'augmentar el rendiment energètic fins valors pròxims al 100% respecte a les amplificacions clàssiques, al mateix temps que presenta una THD (Distorsió Harmònica Total) teòrica nul·la [1]. Aquest bon rendiment energètic fa pensar que la classe D resulta especialment útil en sistemes que facin ús de bateries augmentant-ne l'autonomia, així com equips que hagin de treballar amb elevades potències reduint el pes i el consum de l'aparell. Avui en dia la primera de les aplicacions descrites ja és una realitat. La gran majoria d'aparells portàtils actuals que disposen d'un sistema que permeti reproduir àudio ja fan us de la classe D per tal d'estalviar bateria i reduir el pes de l'equip. Pel que fa a la segona aplicació, la classe D orientada a altes potències, encara queda molt per fer ja que problemes tecnològics fan que sigui molt complicada la seva implementació.

El principi bàsic de funcionament d'un amplificador en classe D el trobem en l'electrònica de potència commutada. La idea per tenir el millor rendiment energètic és base en no utilitzar cap dels dispositius de potència en la seva regió lineal, és a dir, treballar en tall o saturació. D'aquesta manera els transistors mai tindran un efecte resistiu i per tant no hi haurà dissipació tèrmica per efecte Joule. Per tal de poder representar una ona d'àudio usant uns poc nivells de tensió és necessari recórrer a algun tipus de modulació com ara la PWM (modulació per amplada de pols).

2. Fonaments de l'amplificador en classe D

Un amplificador en classe D és un convertidor de potència commutat capaç d'entregar una ona d'àudio sobre la carrega (altaveu). Aquest projecte es centre en els amplificadors en classe D basat en modulació PWM. Aquesta tècnica de modulació varia el cicle de treball d'un senyal quadrat de freqüència constant en funció de l'amplitud que pren el senyal modulador. La forma més simplificada d'aconseguir aquesta modulació es usar un comparador amb una entrada connectada al senyal modulador i l'altre a un senyal triangular de la freqüència que vulguem commutar [2]. La fig. 1 ens mostra un exemple de modulació PWM amb tres nivells on el senyal sinusoidal fa el paper de moduladora.

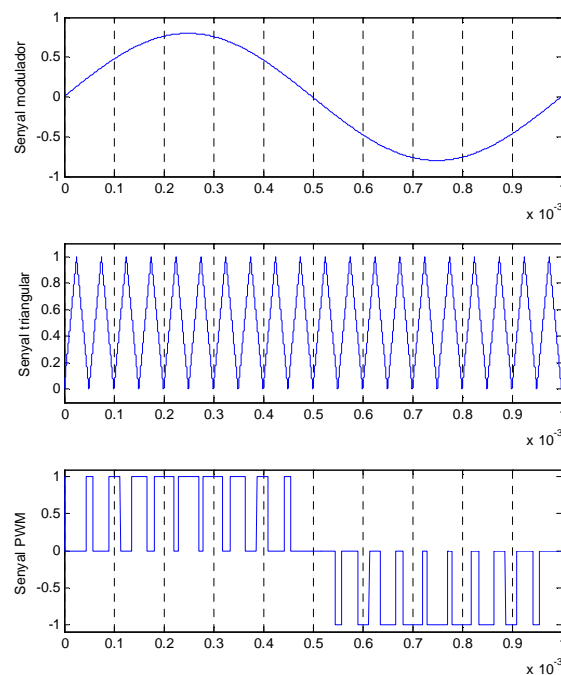


Fig. 1 Exemple de modulació PWM en tres nivells

Un cop es té el senyal d'àudio codificat dins d'un senyal quadrat (senyal PWM) ja es possible amplificar-lo sense usar la zona lineal dels transistors de potència. Fent commutar els MOSFETs de l'etapa de potència amb el senyal PWM obtenim a la sortida un nou senyal PWM però amb amplitud pràcticament igual a la tensió amb la qual s'alimenta l'etapa de potència.

Per tal de recuperar l'ona d'àudio és necessari un filtre pas baix que ens elimini la freqüència de commutació i les components d'alta freqüència deixant net el senyal audible. En la fig. 2 es mostra un esquema simplificat d'un

amplificador en classe D en el qual s'hi aprecia la modulació, l'etapa de potència, el filtre pas baix i l'altaveu.

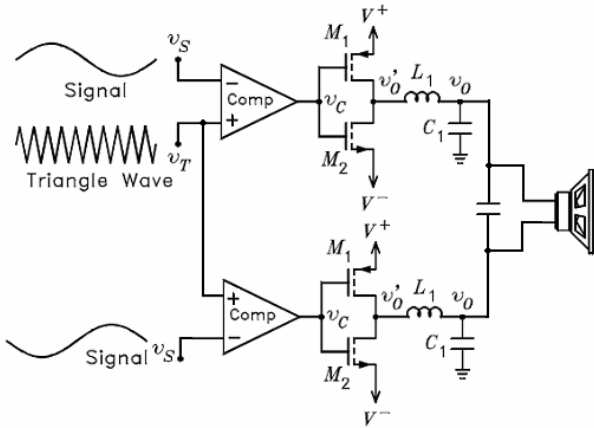


Fig. 2 Simplificació d'un amplificador en classe D (llaç obert)

Un sistema en llaç obert com el que es presenta a la fig. 2 és molt sensible a pertorbacions externes com ara interferències o variació de la tensió d'alimentació. Aquestes pertorbacions fan que l'amplificador no es comporti de la forma desitjada. Per tal de millorar les especificacions de l'amplificador es necessari recórrer a la realimentació fent així el sistema més robust. Mitjançant un control en llaç tancat és possible corregir les imperfeccions que tot sistema real presenta reduint així l'error i millorant la THD. En la fig. 3 és mostra la topologia de l'amplificador en classe D en llaç tancat.

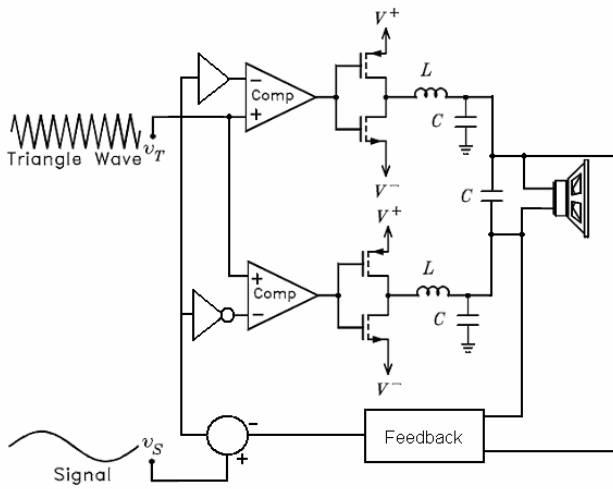


Fig. 3 Simplificació d'un amplificador en classe D (llaç tancat)

3. Etapa de potència

L'etapa de potència està formada pel pont de MOSFETs, els drivers i el filtre reconstructor.

El pont de MOSFETs està format per quatre transistors de potència disposats en una topologia de pont complet. Aquesta configuració imposa que la tensió sobre l'altaveu serà flotant. S'ha triat aquesta topologia ja que ens permet realitzar una modulació de tres nivells i a més es capaç d'entregar a la carrega tota la tensió disponible en l'alimentació. En la fig. 4 podem veure una topologia en pont complet amb una carrega genèrica R_L .

Gràcies a l'etapa de potència en pont complet es possible fer una modulació a tres nivells la qual aporta avantatges en quant a la millora de la THD. La tècnica de commutació emprada consisteix en destinar dos transistors a cada semiperíode del senyal d'entrada de manera que en un semiperíode mig pont commutarà mentre l'altre branca resta inactiva deixant el transistor superior en tall i l'inferior en saturació. Aquesta estratègia també permet reduir les pèrdues de commutació ja que realment només estarem commutant dos transistors a la freqüència de commutació i per tant les seves pèrdues seran pràcticament les mateixes que les d'un muntatge en mig pont.

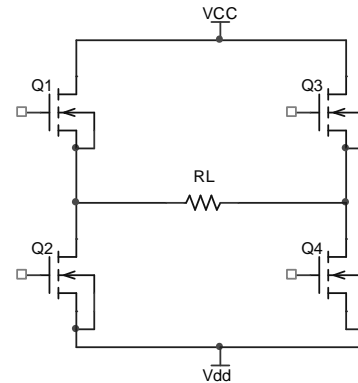


Fig. 4 Muntatge en pont complet

El filtre reconstructor es dissenya amb la finalitat d'eliminar els harmònics de més alta freqüència del senyal PWM. Tal com mostra la fig. 5 un cop el filtre ha realitzat la seva funció el senyal de sortida (V_{O2}) passa a tenir la mateixa forma que l'entrada multiplicada per el guany (V_{O1}).

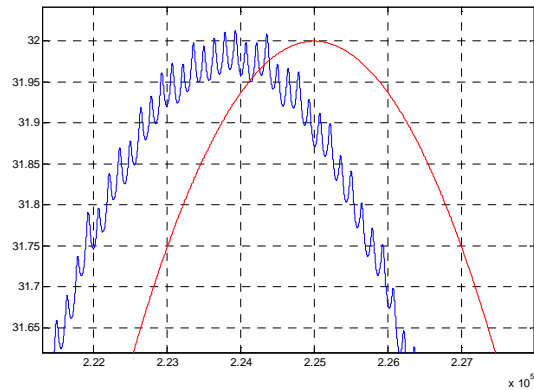


Fig. 5 Formes d'ona ideal i real a la sortida del filtre

Cal observar que en qualsevol cas a la sortida sempre tindrem un petit arriestat a la freqüència de commutació, no obstant això no representa cap problema ja que aquest harmònic sempre es trobarà a una freqüència elevada i a la vegada fora de l'espectre audible; ni l'altaveu seria capaç de reproduir-la ni la nostra oïda capaç de sentir-la.

Es important que el filtre sigui purament reactiu per tal de no introduir pèrdues que farien perillar el rendiment. El més típic en aquests amplificadors és usar un filtre LC de segon ordre. En la fig. 6 podem veure el filtre usat en aquest projecte, un filtre reactiu de segon ordre

preparat per treballar en pont complet, és a dir, amb la carrega flotant [3].

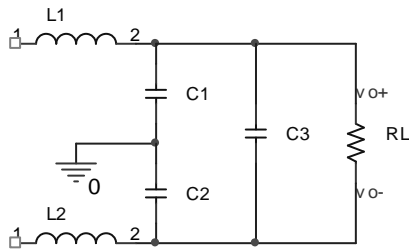


Fig. 6 Filtre reconstructor

Per la topologia del pont de MOSFETs resultaria impossible fer-lo commutar directament amb un senyal PWM, ens cal un driver. El driver es situa entre la sortida del modulador i la porta del transistor de potència. Pel que fa els transistors inferior (Q2 i Q4 en la fig. 4) és necessari que el driver entregui una tensió mínima V_{dd} i una tensió màxima $V_{dd}+V_{GS}$; entenent V_{GS} com la tensió entre porta i sortidor del MOSFET necessària per que aquest entri en conducció. Aquesta tensió és pot aconseguir fàcilment amb una font independent referida a V_{dd} . A més a més també es necessària fer una inversió de fase del senyal PWM per tal que la sortida de l'amplificador estigui en fase amb l'entrada. Pel que fa el driver dels transistors superiors (Q1 i Q3 en la fig. 4) és més complicat fer-los commutar ja que el seu sortidor es troba flotant. En aquest projecte s'ha usat la tècnica de bootstrap la qual permet entregar una tensió V_{GS} flotant als MOSFETs superiors.

La tècnica de bootstrap es basa en carregar un condensador amb una font de tensió independent referida a V_{dd} (la mateixa font que ens permet fer commutar els transistors inferiors). Quan un transistor inferior estigui en conducció el condensador serà carregat. En canviar l'entrada PWM, el transistor inferior es posa en tall deixant el condensador carregat i flotant. Amb la tensió disponible en el condensador ja és possible fer commutar el transistor superior ja que si el condensador és prou gran es pot considerar que es comporta com una font de tensió independent i flotant [4]. En la fig. 7 ens mostra l'esquema de la tècnica bootstrap descrita.

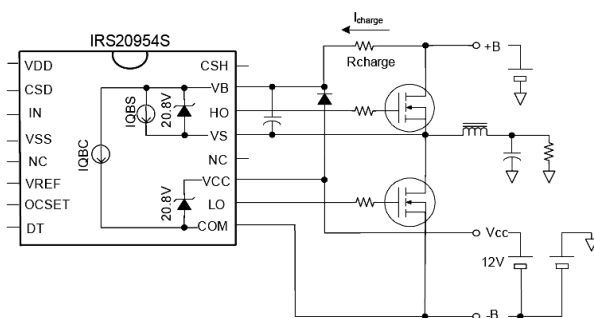


Fig. 7 Driver amb condensador de bootstrap

4. Circuit de control

El circuit de control està format pel modulador PWM i les diferents xarxes de la realimentació (veure fig. 3). Per tal de realitzar un disseny del control el més realista possible s'ha optat per usar Matlab per modelar la impedància d'una altaveu de tres vies. La fig. 8 ens mostra la impedància d'una possible carrega en funció de la freqüència. Aquest model de la carrega s'ha obtingut estudiant el circuit equivalent de cada un dels tres altaveus que formen una caixa de tres vies (greus, mitjos i aguts). Seguidament ha estat necessari estudiar un divisor de freqüències real amb el qual és connecten els tres altaveus. Un cop es té aquest model se li incorpora el filtre reconstructor per tal d'obtenir el diagrama de Bode del sistema i dissenyar un control.

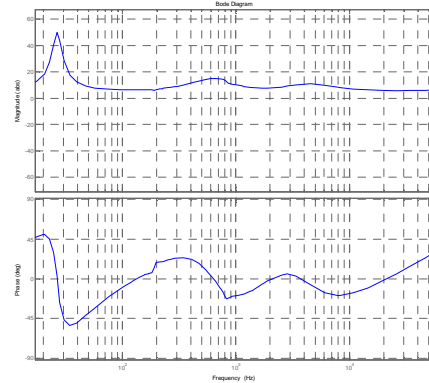


Fig. 8 Impedància de l'altaveu

El modulador PWM s'ha construït amb dos moduladors sincronitzats. Cada modulador se n'encarrega d'un semiperíode del senyal d'entrada i per tant dels corresponents MOSFETs. Els PWM usats només són capaços de modular senyals positives, però aquesta limitació ens és profitosa ja que per tal d'aconseguir la modulació en tres nivells només és necessari connectar a un modulador el senyal d'entrada i a l'altre el mateix senyal en inversió de fase (veure fig. 2 i fig. 3). La fig. 9 ens mostra la sortida de cada modulador per una entrada sinusoidal. El modulador anomenat mestre és també l'encarregat de generar el senyal rampa, mentre que l'esclau usará la rampa del mestre per fer la seva modulació.

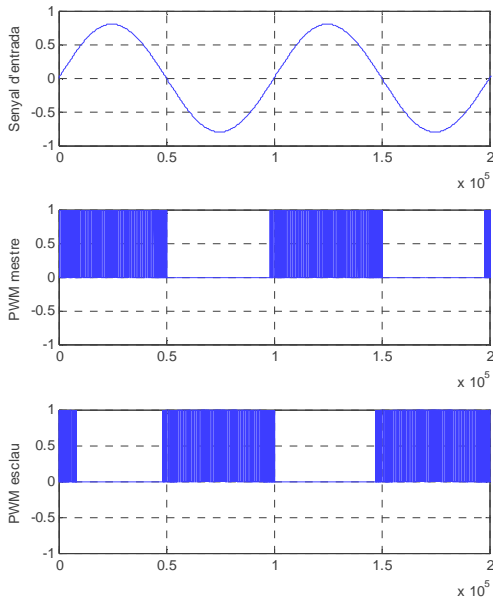


Fig. 9 Senyals PWM en cada modulador

El controlador de l'amplificador en classe D dissenyat ha estat realitzat amb xarxes de compensació. En la fig. 10 s'hi pot veure el diagrama de Bode de l'amplificador amb el model de la carrega realista (impedància que es mostra en la fig. 8). El marge de fase és d'aproximadament 2° fet que posa de manifest la necessitat d'una xarxa en avançament de fase.

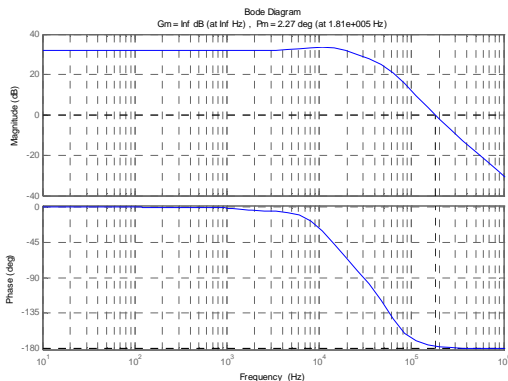


Fig. 10 Diagrama de Bode de l'amplificador enllaç obert

El control que s'ha implementat finalment consta de dues xarxes. Una xarxa en avançament de fase amb zero a 40KHz i pol a 400KHz per tal de millorar l'estabilitat del sistema i una segona xarxa de retràs de fase amb pol a 10KHz i zero a 200KHz per tal de rebutjar l'arrissat. La fig. 11 ens mostra el Bode del controlador dissenyat. Observar com la fase augmenta per el punt més crític del Bode de la fig. 10 i com el mòdul atenua uns 6dB la freqüència de commutació per tal de rebutjar el soroll. En (1) hi podem veure la funció de transferència del control.

$$H(S) = \left(\frac{1}{2\pi 200K} S + 1 \right) \left(\frac{1}{2\pi 40K} S + 1 \right) \left(\frac{1}{2\pi 10K} S + 1 \right) \left(\frac{1}{2\pi 400K} S + 1 \right) \quad (1)$$

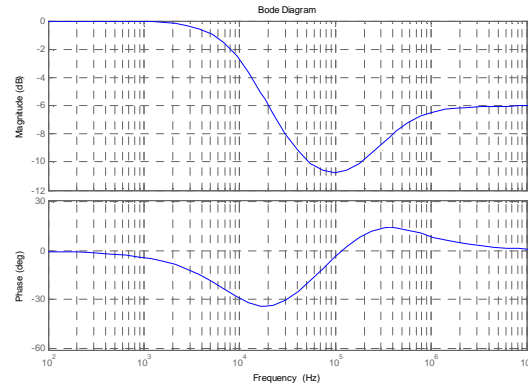


Fig. 11 Xarxa de compensació

5. Circuit dissenyats

En les següents figures podem veure els esquemàtics del circuits dissenyats. La fig. 13 ens mostra l'esquemàtic complet de l'etapa de potència juntament amb els dos moduladors PWM. La fig. 14 ens mostra el controlador dissenyat. En la fig. 12 s'hi pot veure el prototipus que s'ha construït.

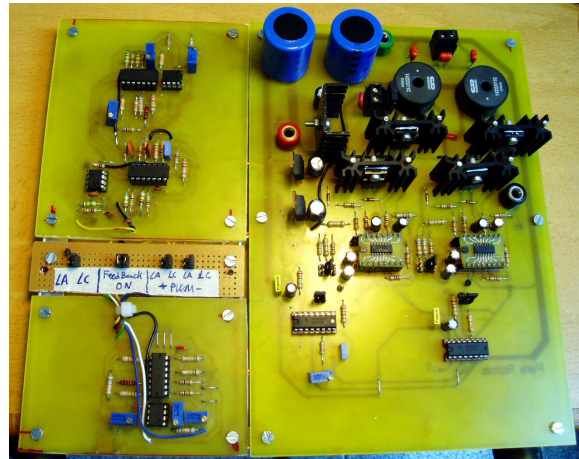


Fig. 12 Prototipus del amplificador en classe D

6. Conclusions

L'amplificació en classe D resulta una bona alternativa a l'amplificació clàssica. En equips portàtils aquesta tecnologia ja ha conquistat el mercat ja que aporta grans avantatges en rendiment energètic. Pel que fa a contextos més específics, com ara la sonorització de grans espais, encara queda molt per fer.

Tot i que el funcionament bàsic d'aquests amplificadors resulta fàcil d'entendre, no obstant a l'hora d'implementar-lo apareixen problemes derivats de limitacions tecnològiques. La necessitat de commutar a freqüències elevades per tenir una resposta plana en l'espectre audible complica el disseny de l'amplificador i a la vegada fa imprescindible usar components específics que treballin correctament en alta freqüència.

Simulacions realitzades demostren que si es pot commutar a freqüència prou elevada l'amplificador en classe D és realment una molt bona tecnologia capaç de suplantar les tècniques clàssiques d'amplificació.

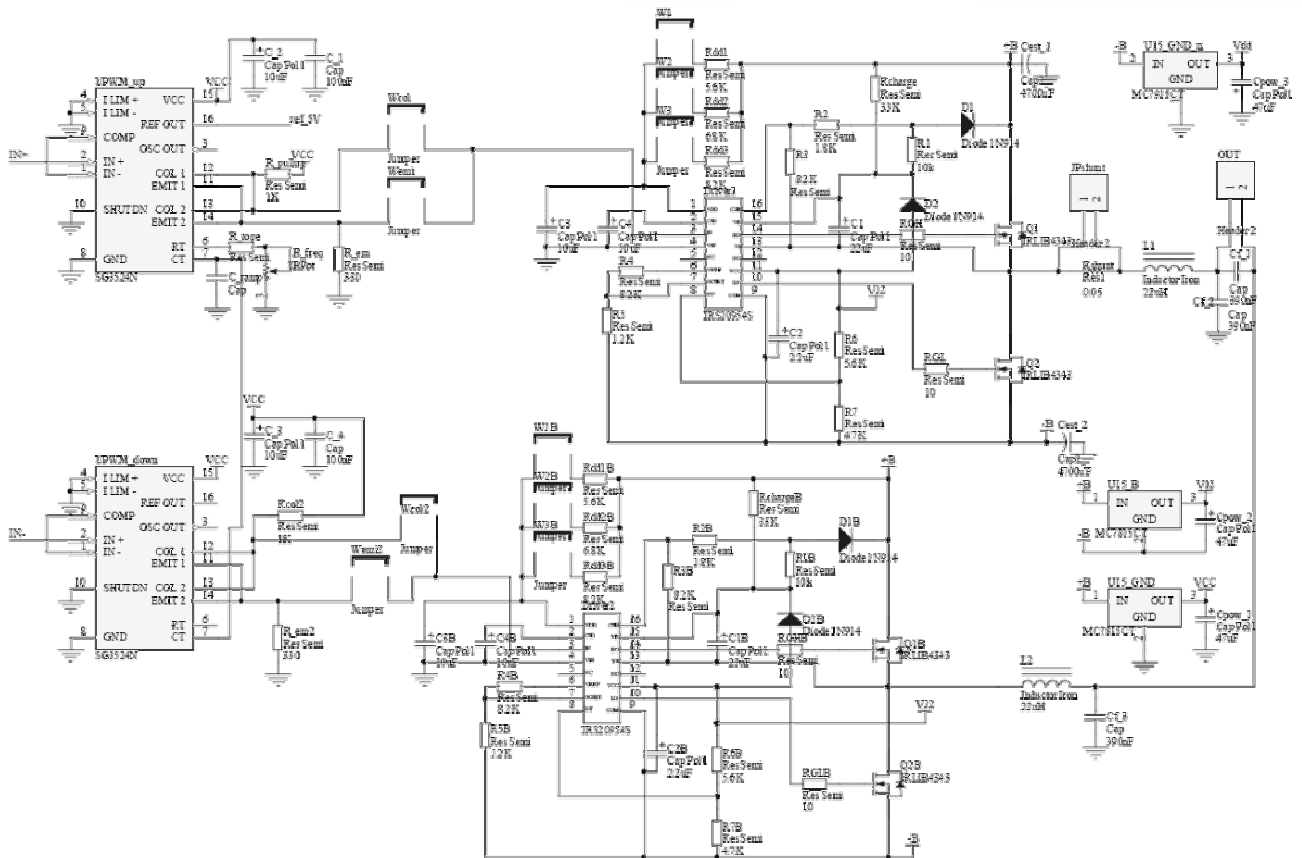


Fig. 13 Etapa de potència i PWM

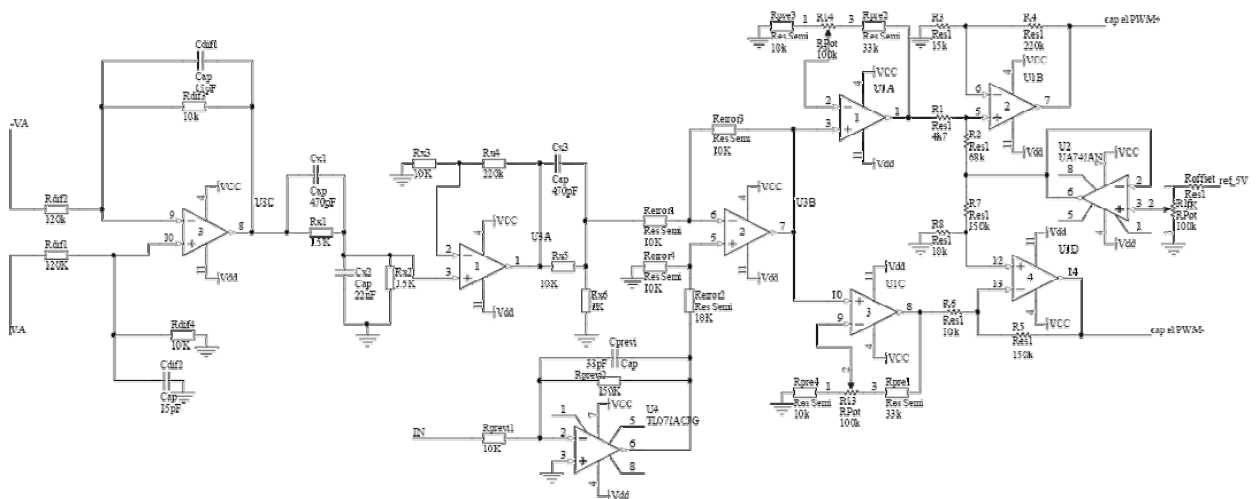


Fig. 14 Controlador

Referències

- [1] J. Honda and J. Adams. (2005, Class D audio amplifier basics. Application Note 1071 (International Rectifier)
- [2] W. Leach. (2001, "The class-D Amplifier," in "Introduction to Electroacoustics and Audio Amplifier Design"
- [3] Dallas semiconductor MAXIM, 2002 "Class D Audio Output Filter Optimization". Application note 624
- [4] International Rectifier, 2007 "HV Floating MOS-Gate Driver Ics". Application Note 978