Universidad
Politécnica
de Cartagena

www.upct.es

Universidad Politécnica de Cartagena

507102009 Diseño y Simulación Electrónica

Desarrollo de la asignatura 3

Objetivo

Amplificador de audio para casa

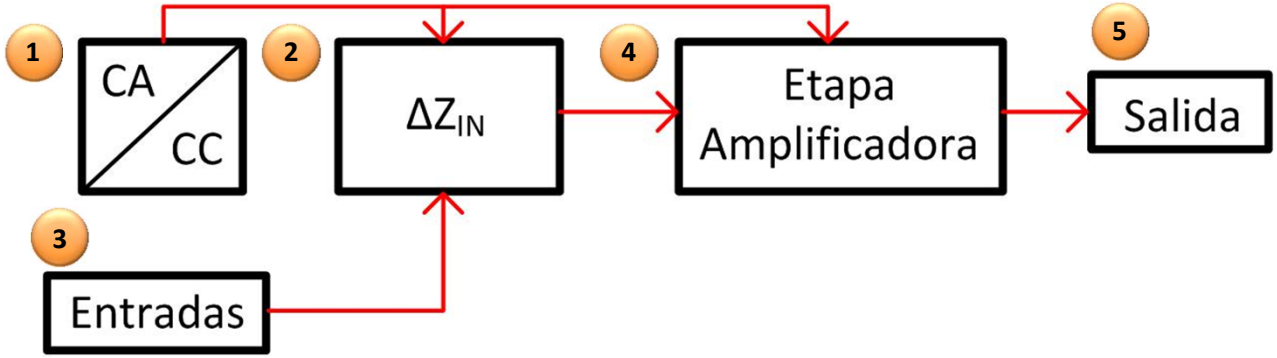


Diagrama de bloques principal

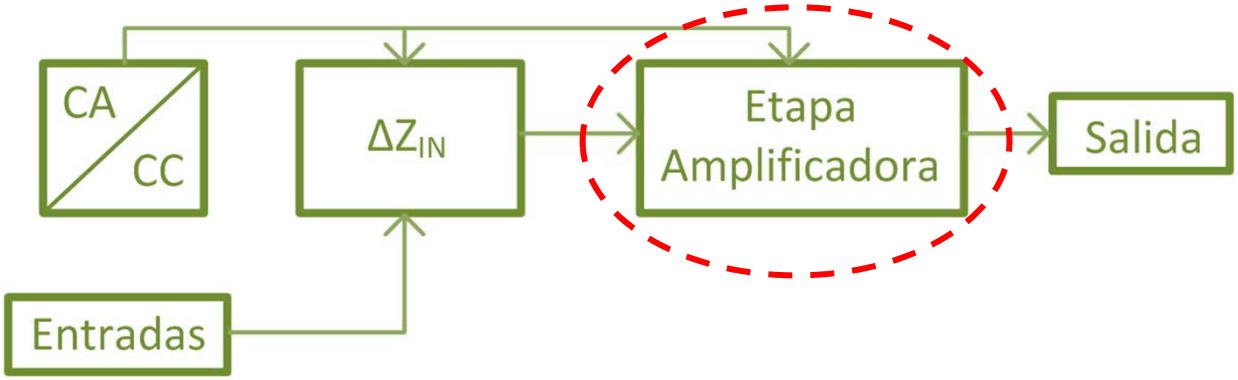
Especificaciones:

- Conexión a la red eléctrica $220V_{ef}$.
- Admita varios tipos de entrada de señal
- Ecualizador (Bass, Middle, Treble)
- Conectable a Baffle (caja acústica) de 3 vías.
- Mejoras, ampliaciones, etc.

4 Etapa amplificadora (≅10W Mono)

a) Transistores *(Clase A/AB)*
b) Circuito integrado *(TDA2003)*

V_{CC}:	9-24V.
I_{CC}:	hasta 4A.
P_{OUT}:	10W.
Z_{OUT}:	4-8Ω.



Clasificación de amplificadores

Ecuaciones Previas

$$\eta_{\%} = \frac{P_U}{P_T} = \frac{P_{Altavoz}}{P_{Fuente}}$$

$$P_{Carga} = V_{ef}\, I_{ef} \longrightarrow P_{Carga} = \frac{V_p}{\sqrt{2}}\,\frac{I_p}{\sqrt{2}} = \frac{V_p\, I_p}{2}$$

$$P_{Carga} = \frac{V_{ef}^2}{R} \longrightarrow P_{Carga} = \frac{\left(\frac{V_{PP}}{2\sqrt{2}}\right)^2}{R} = \frac{V_{PP}^2}{8R} = \frac{V_P^2}{2R}$$

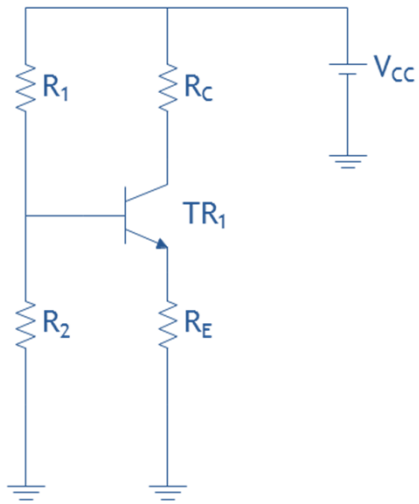
$$P_{Fuente} = V_{CC}\, I_{CC} = \frac{V_{CC}^2}{R}$$

Clasificación de amplificadores

Clase A

En este tipo de amplificadores **el transistor está conduciendo todo el tiempo**, es decir, el punto Q nunca alcanza el estado de corte o saturación. Esto quiere decir que, incluso sin entrada de señal, el transistor está disipando potencia. Por este motivo, el rendimiento de un amplificador trabajando en clase A no es muy alto. Su límite teórico es del **25%**.

Para una entrada senoidal la salida del circuito también es senoidal.

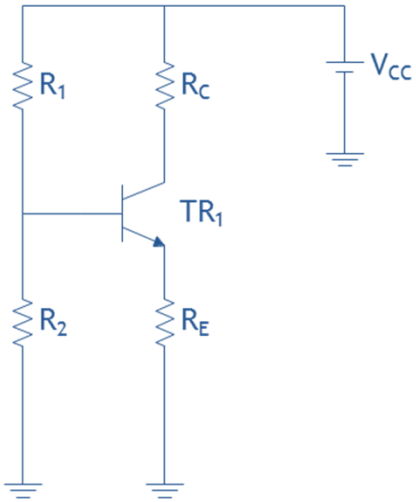


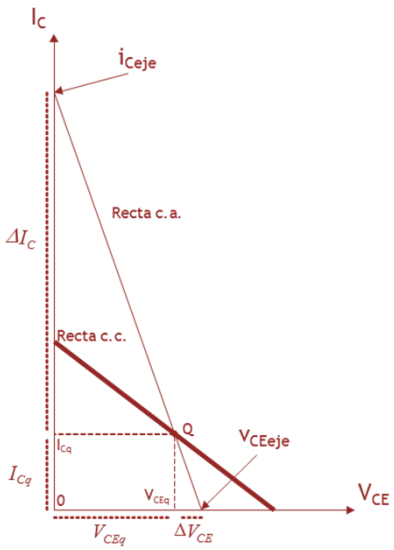
Clasificación de amplificadores

Clase A

En este tipo de amplificadores **el transistor está conduciendo todo el tiempo**, es decir, el punto Q nunca alcanza el estado de corte o saturación. Esto quiere decir que, incluso sin entrada de señal, el transistor está disipando potencia. Por este motivo, el rendimiento de un amplificador trabajando en clase A no es muy alto. Su límite teórico es del **25%**.

Para una entrada senoidal la salida del circuito también es senoidal.



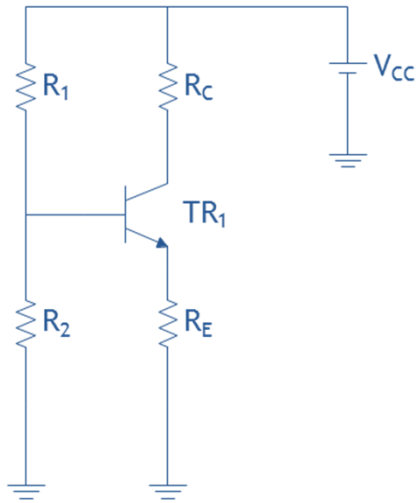


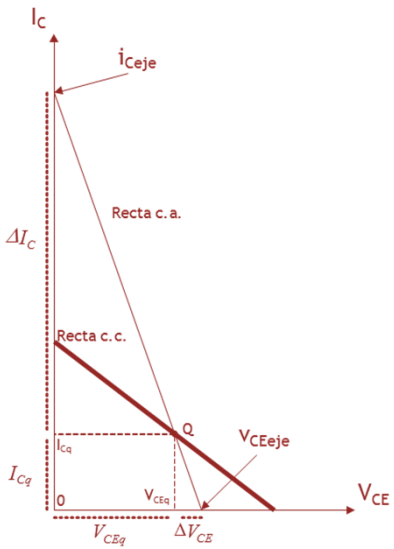
Clasificación de amplificadores

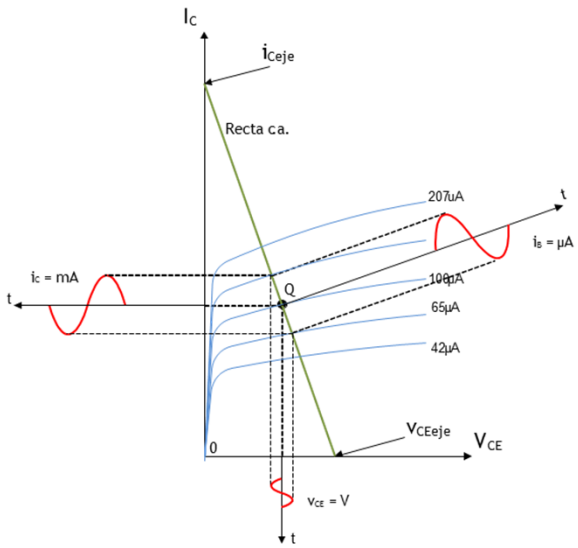
Clase A

En este tipo de amplificadores **el transistor está conduciendo todo el tiempo**, es decir, el punto Q nunca alcanza el estado de corte o saturación. Esto quiere decir que, incluso sin entrada de señal, el transistor está disipando potencia. Por este motivo, el rendimiento de un amplificador trabajando en clase A no es muy alto. Su límite teórico es del **25%**.

Para una entrada senoidal la salida del circuito también es senoidal.





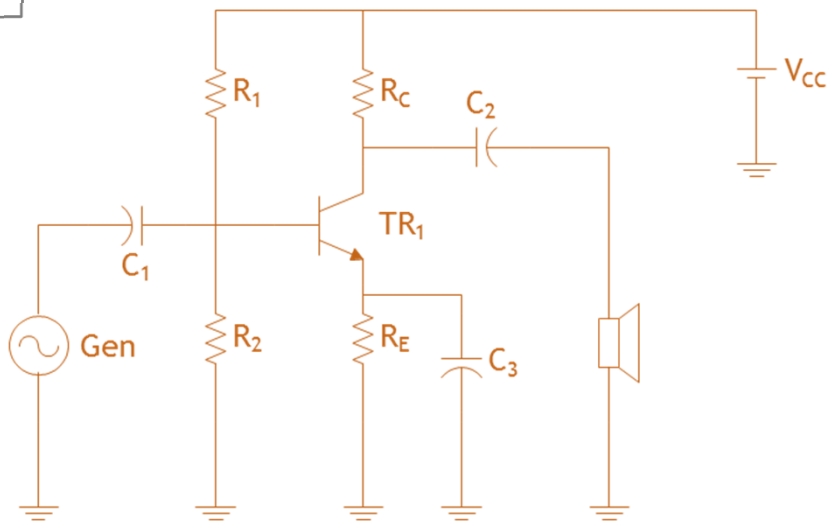


Clasificación de amplificadores

Clase A

En este tipo de amplificadores **el transistor está conduciendo todo el tiempo**, es decir, el punto Q nunca alcanza el estado de corte o saturación. Esto quiere decir que, incluso sin entrada de señal, el transistor está disipando potencia. Por este motivo, el rendimiento de un amplificador trabajando en clase A no es muy alto. Su límite teórico es del **25%**.

Para una entrada senoidal la salida del circuito también es senoidal.

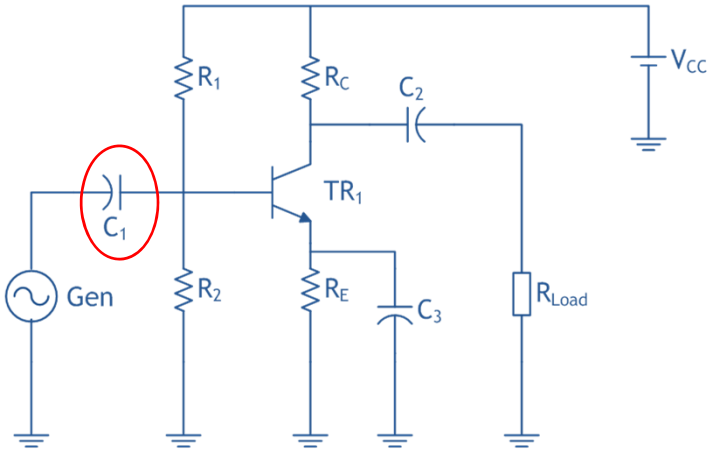


Clasificación de amplificadores

Clase A

En este tipo de amplificadores **el transistor está conduciendo todo el tiempo**, es decir, el punto Q nunca alcanza el estado de corte o saturación. Esto quiere decir que, incluso sin entrada de señal, el transistor está disipando potencia. Por este motivo, el rendimiento de un amplificador trabajando en clase A no es muy alto. Su límite teórico es del **25%**.

Para una entrada senoidal la salida del circuito también es senoidal.

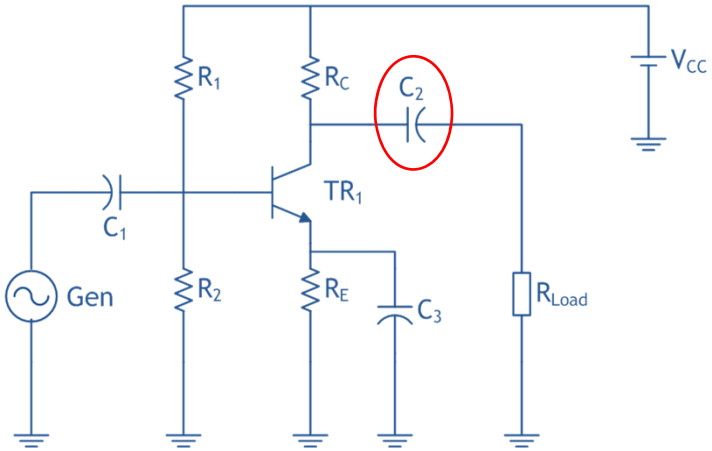


Clasificación de amplificadores

Clase A

En este tipo de amplificadores **el transistor está conduciendo todo el tiempo**, es decir, el punto Q nunca alcanza el estado de corte o saturación. Esto quiere decir que, incluso sin entrada de señal, el transistor está disipando potencia. Por este motivo, el rendimiento de un amplificador trabajando en clase A no es muy alto. Su límite teórico es del **25%**.

Para una entrada senoidal la salida del circuito también es senoidal.

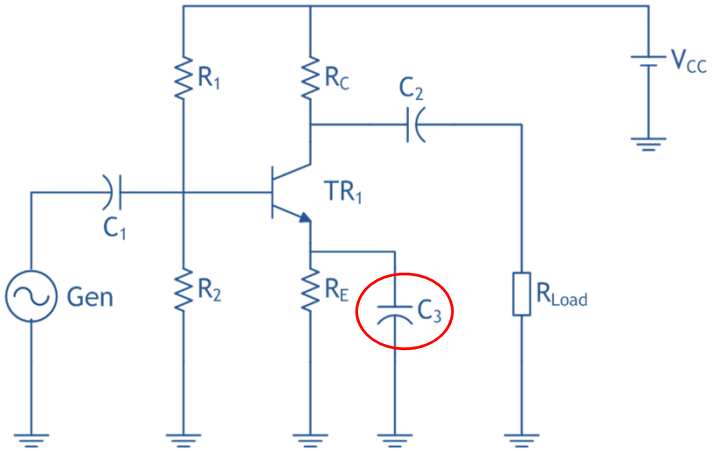


Clasificación de amplificadores

Clase A

En este tipo de amplificadores **el transistor está conduciendo todo el tiempo**, es decir, el punto Q nunca alcanza el estado de corte o saturación. Esto quiere decir que, incluso sin entrada de señal, el transistor está disipando potencia. Por este motivo, el rendimiento de un amplificador trabajando en clase A no es muy alto. Su límite teórico es del **25%**.

Para una entrada senoidal la salida del circuito también es senoidal.

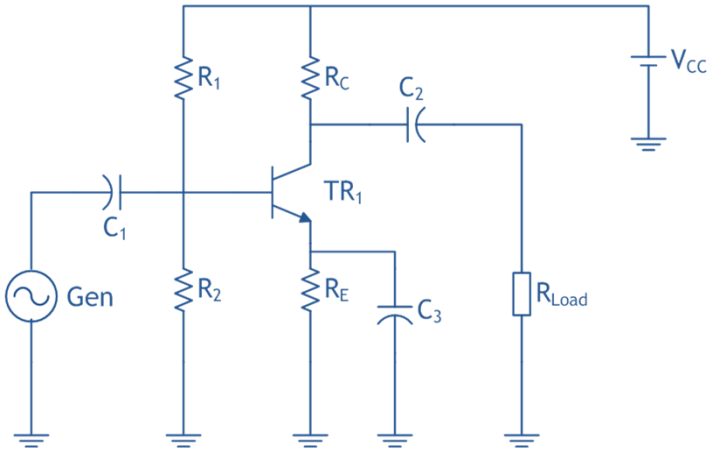


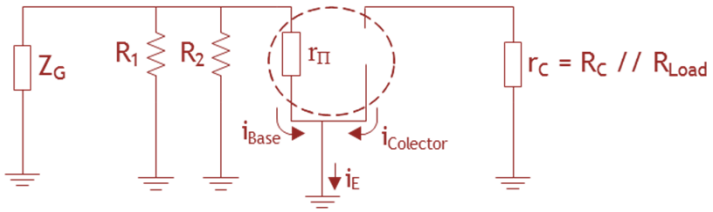
Clasificación de amplificadores

Clase A

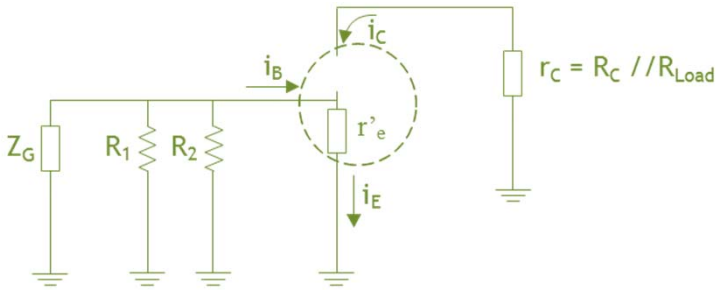
En este tipo de amplificadores **el transistor está conduciendo todo el tiempo**, es decir, el punto Q nunca alcanza el estado de corte o saturación. Esto quiere decir que, incluso sin entrada de señal, el transistor está disipando potencia. Por este motivo, el rendimiento de un amplificador trabajando en clase A no es muy alto. Su límite teórico es del **25%**.

Para una entrada senoidal la salida del circuito también es senoidal.





Modelo equivalente en Π



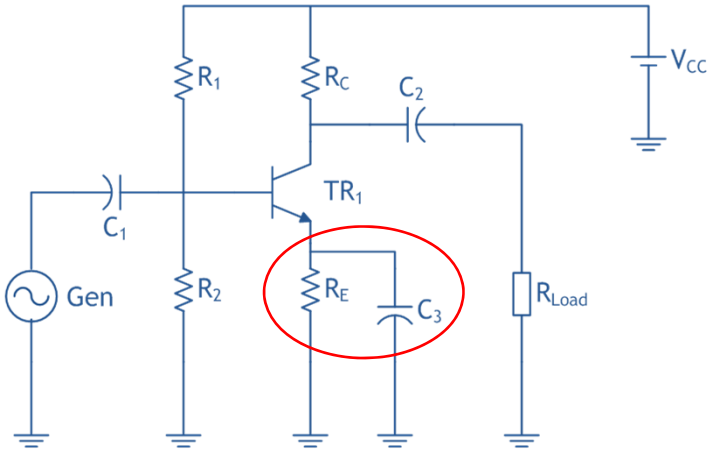
Modelo equivalente en R o en T

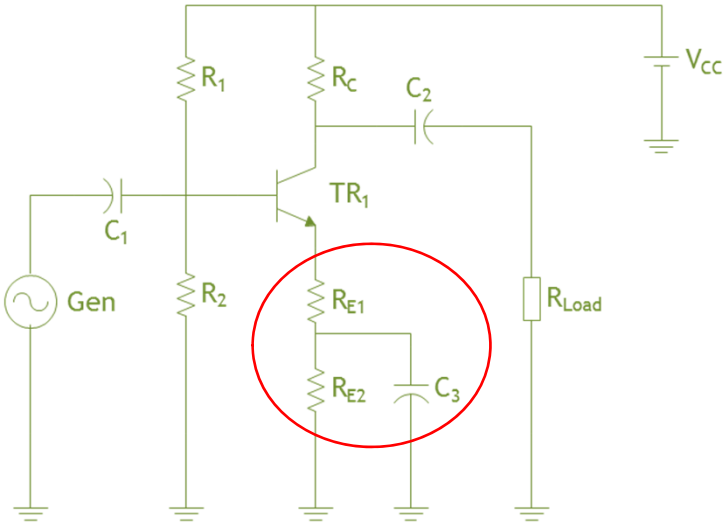
Clasificación de amplificadores

Clase A

En este tipo de amplificadores **el transistor está conduciendo todo el tiempo**, es decir, el punto Q nunca alcanza el estado de corte o saturación. Esto quiere decir que, incluso sin entrada de señal, el transistor está disipando potencia. Por este motivo, el rendimiento de un amplificador trabajando en clase A no es muy alto. Su límite teórico es del **25%**.

Para una entrada senoidal la salida del circuito también es senoidal.



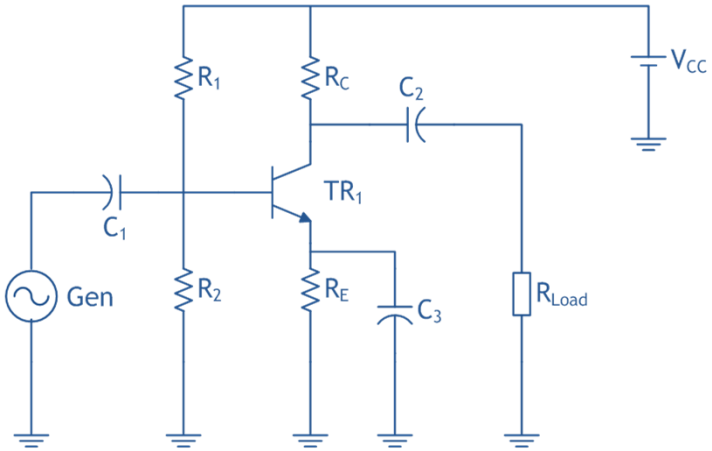


Clasificación de amplificadores

Clase A

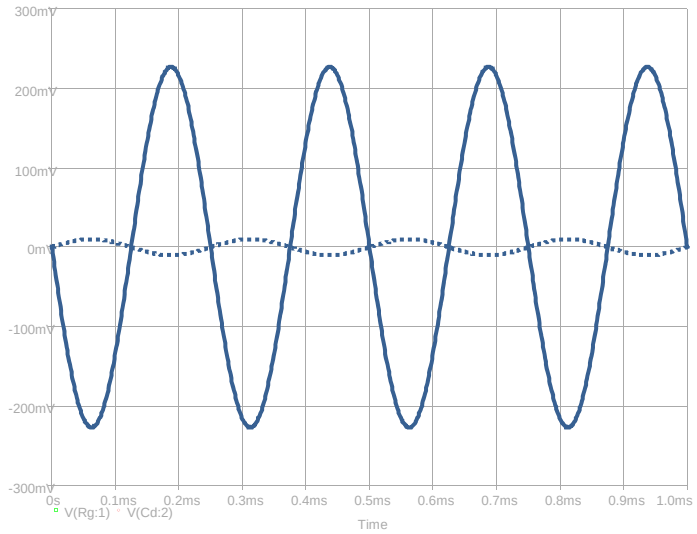
En este tipo de amplificadores **el transistor está conduciendo todo el tiempo**, es decir, el punto Q nunca alcanza el estado de corte o saturación. Esto quiere decir que, incluso sin entrada de señal, el transistor está disipando potencia. Por este motivo, el rendimiento de un amplificador trabajando en clase A no es muy alto. Su límite teórico es del **25%**.

Para una entrada senoidal la salida del circuito también es senoidal.



$$P_{Fuente} = V_{CC}\, I_{CC} = \frac{V_{CC}^2}{R} \qquad P_{Carga} = \frac{V_P^2}{2R}$$

$$\eta_{\%} = \frac{P_{Carga}}{P_{Fuente}} = \frac{\frac{V_{CC}^2}{2R}}{\frac{V_{CC}^2}{R}} = 0.5 \cdot 100 = \frac{50}{2} = 25\%$$

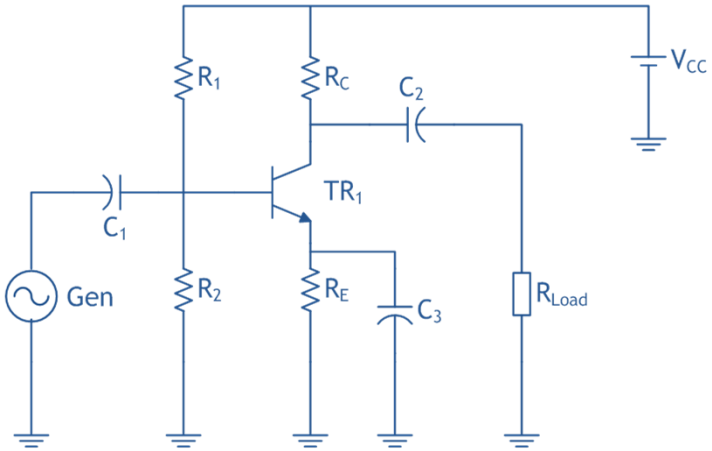


Clasificación de amplificadores

Clase A

En este tipo de amplificadores **el transistor está conduciendo todo el tiempo**, es decir, el punto Q nunca alcanza el estado de corte o saturación. Esto quiere decir que, incluso sin entrada de señal, el transistor está disipando potencia. Por este motivo, el rendimiento de un amplificador trabajando en clase A no es muy alto. Su límite teórico es del **25%**.

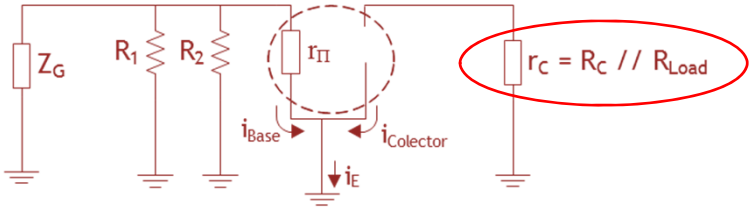
Para una entrada senoidal la salida del circuito también es senoidal.



$$P_{Fuente} = V_{CC}\, I_{CC} = \frac{V_{CC}^2}{R}$$

$$P_{Carga} = \frac{V_P^2}{2R}$$

$$\eta_{\%} = \frac{P_{Carga}}{P_{Fuente}} = \frac{\frac{V_{CC}^2}{2R}}{\frac{V_{CC}^2}{R}} = 0.5 \cdot 100 = \frac{50}{2} = 25\%$$



Modelo equivalente en Π

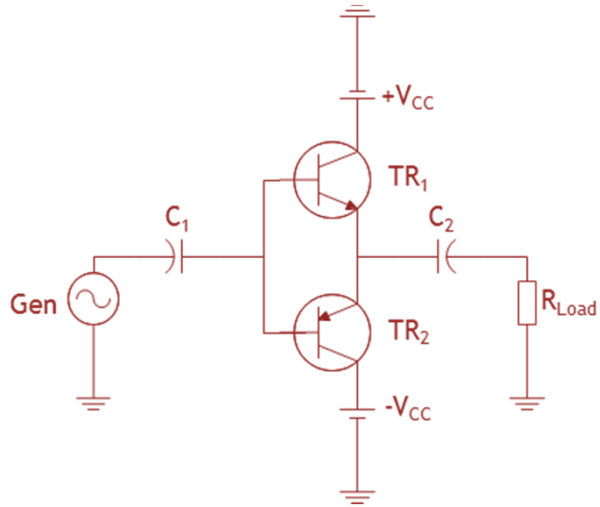
Clasificación de amplificadores

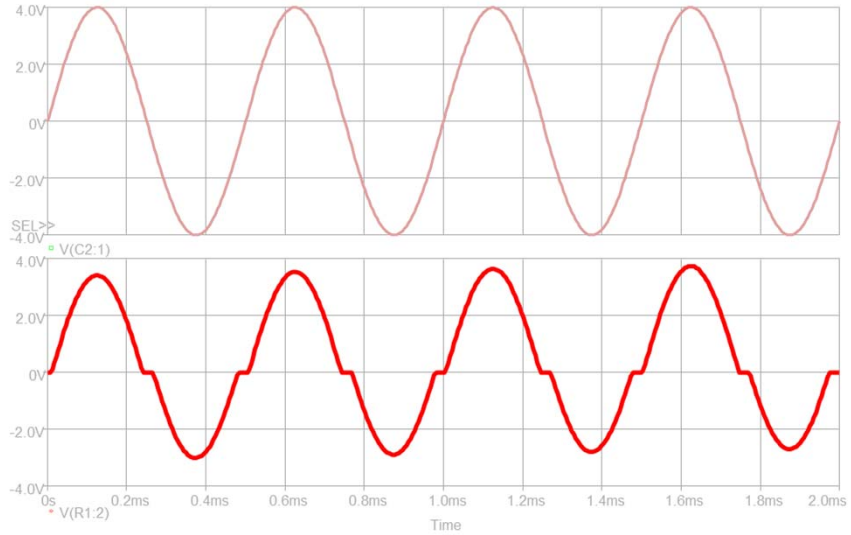
Clase B

Dado que el rendimiento de los amplificadores en clase A no es muy alto, se ideó otra configuración para tratar de aumentar el rendimiento de los amplificadores de audio. Se denominaron amplificadores en **clase B**, también llamados **Push-Pull** o de **simetría complementaria**. En estos circuitos conduce un transistor en cada semiperiodo de la señal. En estos montajes son necesarios dos transistores, un **NPN** y un **PNP**, éstos deben ser complementarios para un mejor funcionamiento del conjunto. Además, necesitamos **dos fuentes de alimentación**, una positiva y otra negativa.

El amplificador Clase B **no tiene Ganancia de tensión** (*Colector Común*).

$$\eta_{\%} = \frac{P_{Carga}}{2 \cdot P_{Fuente}} = \frac{\frac{V_{CC}^2}{2R}}{\frac{2 \cdot V_{CC} \frac{V_{CC}}{R}}{\pi}} = \frac{\pi}{4} = 0.785 \cdot 100 = 78.5\%$$



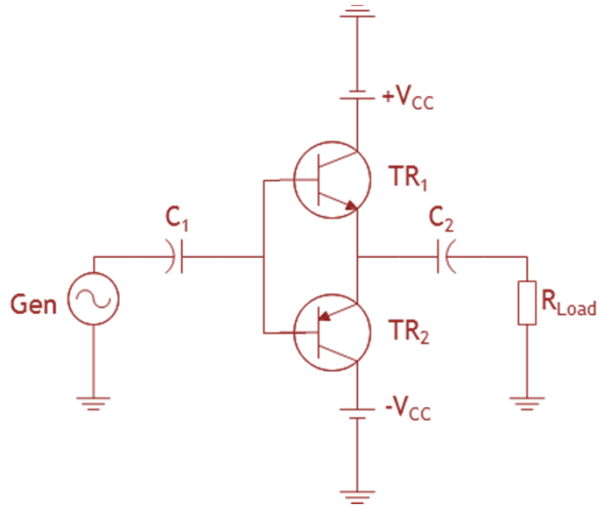


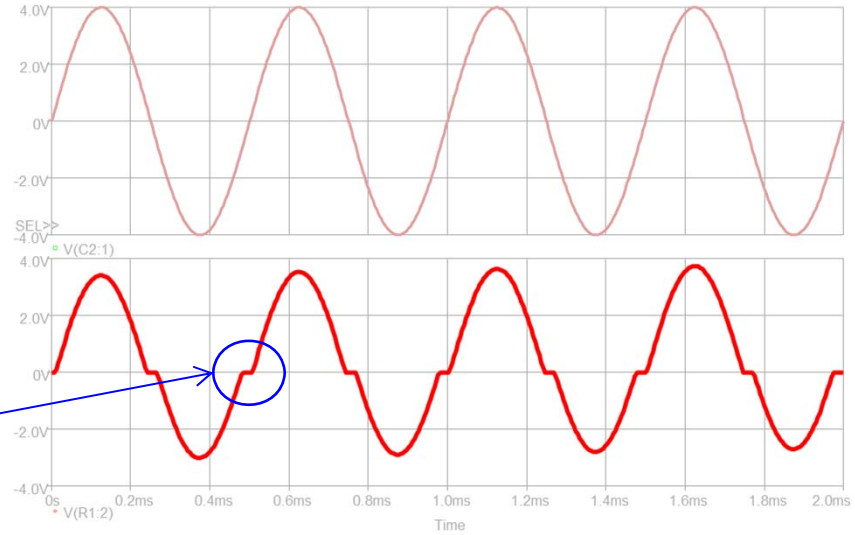
Clasificación de amplificadores

Clase B

Dado que el rendimiento de los amplificadores en clase A no es muy alto, se ideó otra configuración para tratar de aumentar el rendimiento de los amplificadores de audio. Se denominaron amplificadores en **clase B**, también llamados **Push-Pull** o de **simetría complementaria**. En estos circuitos conduce un transistor en cada semiperiodo de la señal. En estos montajes son necesarios dos transistores, un **NPN** y un **PNP**, éstos deben ser complementarios para un mejor funcionamiento del conjunto. Además, necesitamos **dos fuentes de alimentación**, una positiva y otra negativa.

El amplificador Clase B **no tiene Ganancia de tensión** (*Colector Común*).





No existe desfase entre entrada/salida

Distorsión de cruce

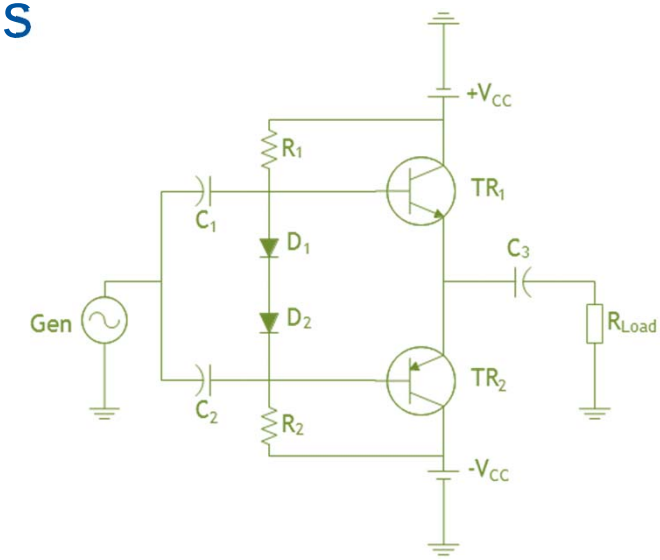
Clasificación de amplificadores

Clase AB

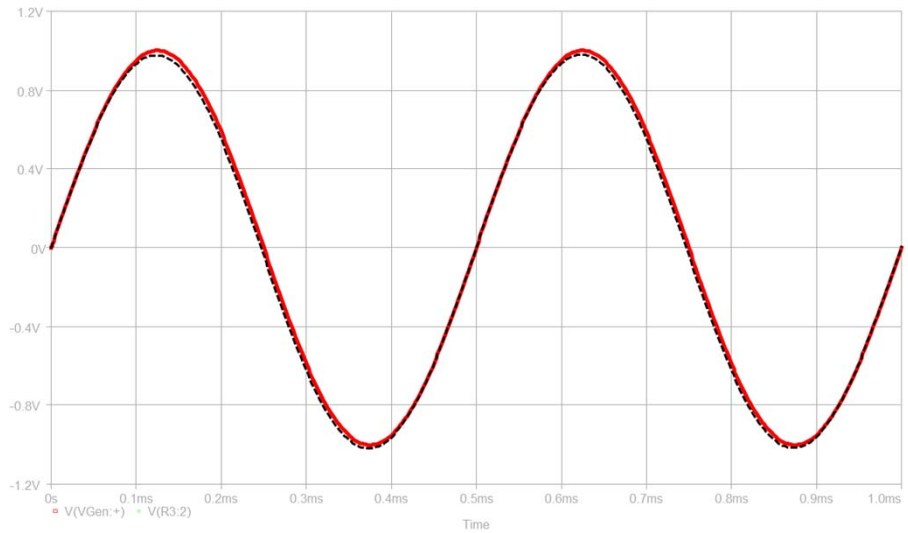
Para conseguir la muy baja distorsión de los amplificadores en clase A y obtener un rendimiento mayor que éstos, la solución viene de la mano de los amplificadores que trabajan en la denominada clase AB.

Para ello, se polariza el punto de trabajo un poco por encima de la zona de corte y así se evita la zona no lineal de trabajo del transistor entorno a este punto de funcionamiento, mediante diodos.

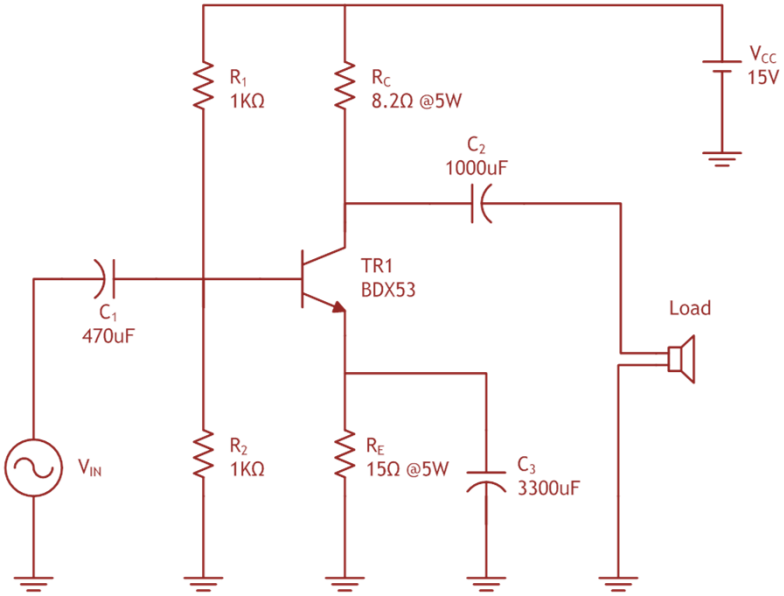
Al igual que sucedía en los amplificadores clase B, no existe desfase entre la entrada y la salida del circuito. Tampoco obtendremos ganancia alguna de tensión.



$$\eta_{\%} = \frac{P_{Carga}}{2 \cdot P_{Fuente}} = \frac{\frac{V_{CC}^2}{2R}}{\frac{2 \cdot V_{CC} \frac{V_{CC}}{R}}{\pi}} = \frac{\pi}{4} = 0.7854 \cdot 100 = 78.5\%$$



a) Etapa amplificadora con transistor

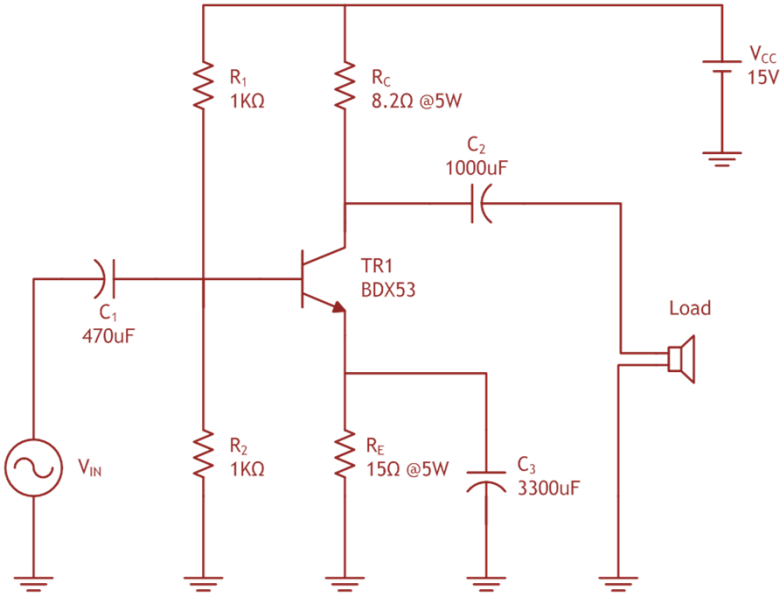


Circuito de partida

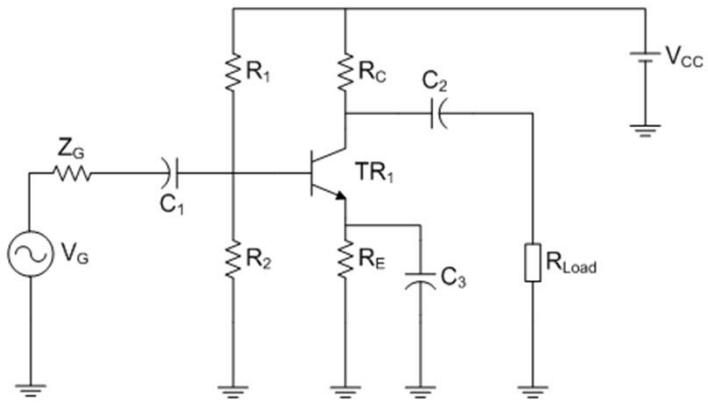
Datos del esquemático

- Transistor en emisor común
- Polarización de emisor
- Transistor Darlington
- Impedancia de salida 8Ω
- Ancho de banda 30kHz

a) Etapa amplificadora con transistor



Circuito de partida

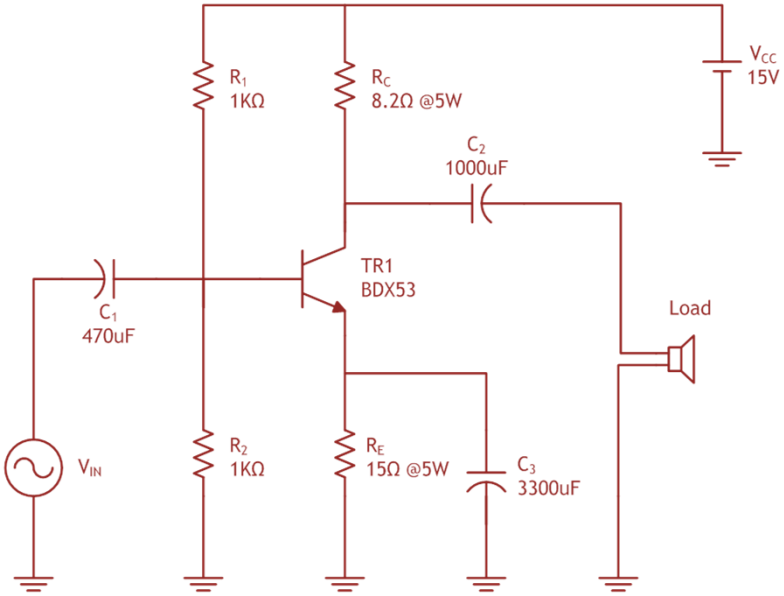


DATOS INICIALES - Emisor común - Pol. Emisor - NPN		
Tensión de alimentación (Vcc) =	15,0	V
Resistencia de polarización (R1) =	1.000	Ω
Resistencia de polarización (R2) =	1.000	Ω
Resistencia de colector (Rc) =	8,2	Ω
Resistencia de emisor (Re) =	15,0	Ω
Ganancia de corriente del transistor (β) =	700	
Tensión Base-Emisor (activa) =	0,70	V
Tensión Colector-Emisor (saturación) =	0,50	V
Potencia disipable por el Transistor =	10.000	mW
Potencia disipable por cada resistencia =	10.000	mW
Tensión térmica (VT) =	26,00	mV
Resistencia de carga (RLoad) =	8,0	Ω
Frecuencia de trabajo inferior =	40	Hz

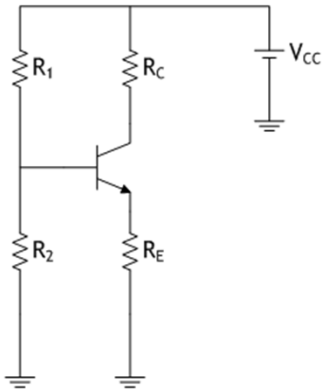
4,05

Introducción de datos

a) Etapa amplificadora con transistor



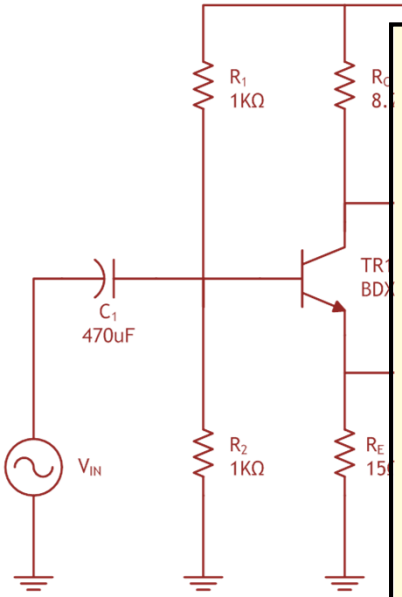
Circuito de partida



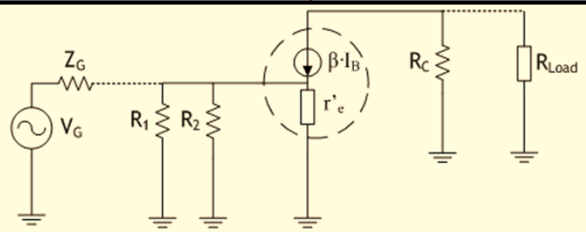
RESULTADOS en corriente continua			
Tensión Thevenin en R1-R2 (Vth) =	7,50	V	
Resistencia Thevenin en R1-R2 (Rth) =	500	Ω	
Corriente de base (Ib) =	617,340	µA	
Corriente de colector (Ic) =	432,138	mA	Ok
Corriente de emisor (Ie) =	432,755	mA	
Corriente colector de saturación (ICsat) =	624,423	mA	
Caída de tensión (Rc) =	3,54	V	23,6%
Tensión Colector-Emisor (Vce) =	4,97	V	Activa
Caída de tensión (Re) =	6,49	V	43,3%
Potencia disipada en Rc =	1.531,29	mW	15,3%
Potencia disipada en el Transistor =	2.145,62	mW	21,5%
Potencia disipada en Re =	2.809,16	mW	28,1%
Potencia total consumida =	6.608,22	mW	
Extremos de la recta de carga =	(15,0V;624,4mA)	(Vcc;Icsat)	
Punto de trabajo del transistor (Q) =	(5,0V;432,1mA)	(VceQ;IcQ)	
Relación (IR1/Ib) =	13		Ok

Circuito equivalente de c.c.
Cálculos de c.c., Punto Q
Zona de trabajo, Potencias, etc.

a) Etapa amplificadora con transistor



Circuito de p



RESULTADOS en corriente alterna (Modelo en 'R')		
Resistencia del modelo de emisor (r'e) =	0,06	Ω
Impedancia de entrada del transistor Zin(TR) =	42,12	Ω
Impedancia de entrada del circuito Zin(CIR) =	38,84	Ω
Impedancia de salida del circuito Zout(CIR) =	8,2	Ω
Ganancia de tensión del circuito (Av) =	-67,30	
Extremos de la recta de carga =	(6,7V;1.658,3mA)	(Vce,Icsat)
Máxima tensión de salida sin distorsión (Mpp) =	3,50	Vpp
Tensión máxima de entrada al circuito (VG) =	0,0520	Vpp
Potencia de pico-pico en la carga PLoad(pp) =	191,38	mW
Condensador de acoplo (C1) =	1.024	µF
Condensador de desacoplo (C2) =	4.852	µF
Condensador de paso (C3) =	2.732	µF
Ganancia de potencia =	2,45	W

$$r'_e = \frac{V_T}{I_E}$$

$$Z_{in(TR)} = (\beta+1)\, r'_e$$

$$Z_{in(Cir)} = R_1 // R_2 // Z_{in(TR)}$$

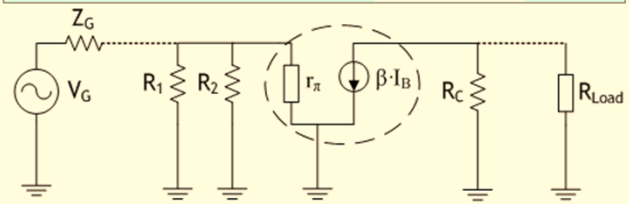
$$Z_{Out} = R_C$$

$$A_V = -\left(\frac{\beta}{\beta+1}\right)\frac{r_C}{r'_e}$$

$$V_{CE} = V_{CEq} + (I_{Cq}\, r_C)$$

$$I_{C(sat)} = I_{Cq} + \frac{V_{CEq}}{r_C}$$

$$M_{pp} = 2\, V_{CEq} = 2\, I_{Cq}\, r_C$$



RESULTADOS en corriente alterna (Modelo en 'π')		
Resistencia del modelo de base (rπ) =	42,12	Ω
Impedancia de entrada del transistor Zin(TR) =	42,12	Ω
Impedancia de entrada del circuito Zin(CIR) =	38,84	Ω
Impedancia de salida del circuito Zout(CIR) =	8,2	Ω
Ganancia de tensión del circuito (Av) =	-67,30	
Extremos de la recta de carga =	(6,7V;1.658,3mA)	(Vce,Icsat)
Máxima tensión de salida sin distorsión (Mpp) =	3,50	Vpp
Tensión máxima de entrada al circuito (VG) =	0,0520	Vpp

$$r_\pi = \frac{V_T}{I_B}$$

$$Z_{in(TR)} = r_\pi$$

$$Z_{in(Cir)} = R_1 // R_2 // Z_{in(TR)}$$

$$Z_{Out} = R_C$$

$$A_V = -\beta\frac{r_C}{r_\pi}$$

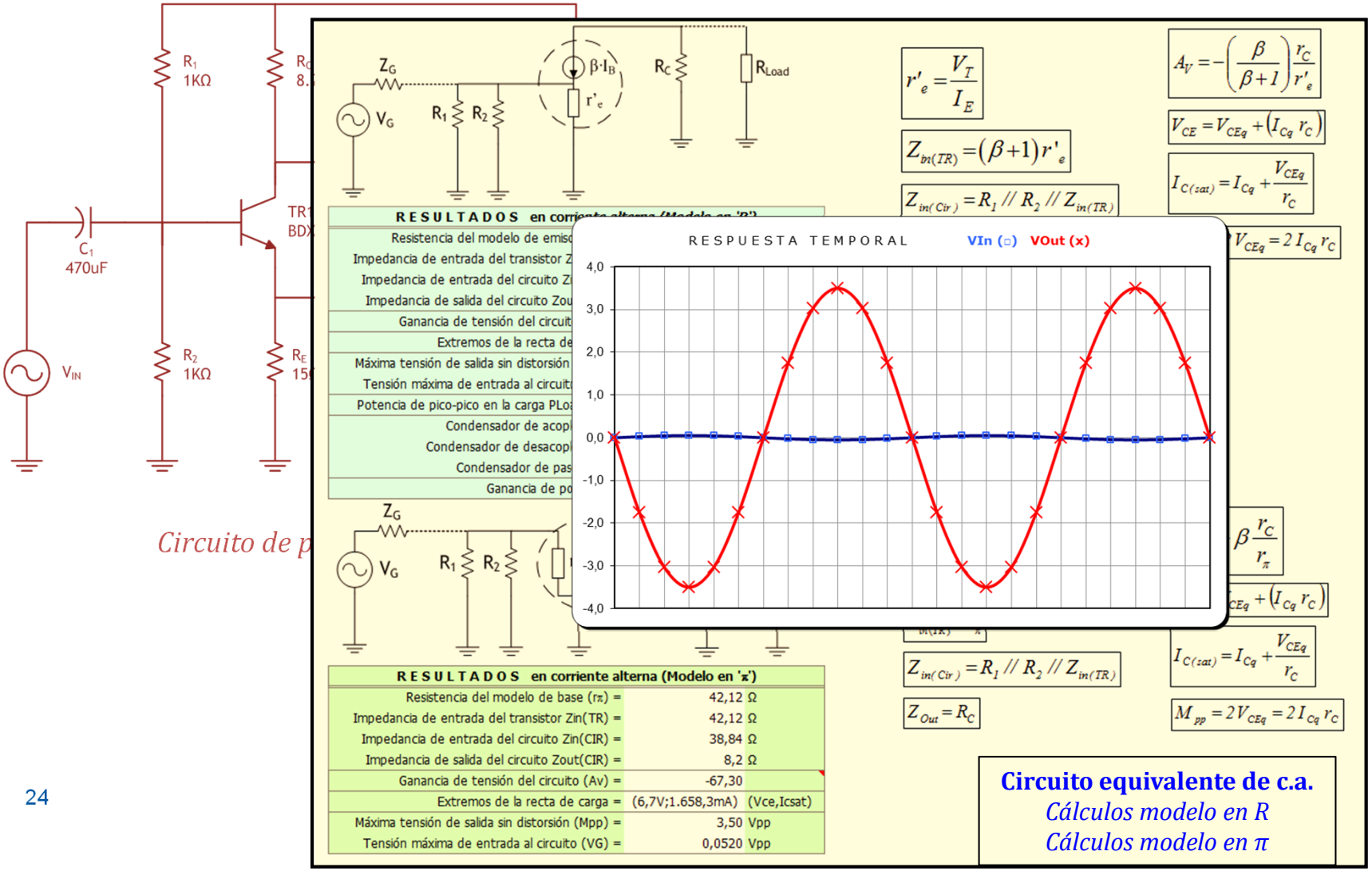
$$V_{CE} = V_{CEq} + (I_{Cq}\, r_C)$$

$$I_{C(sat)} = I_{Cq} + \frac{V_{CEq}}{r_C}$$

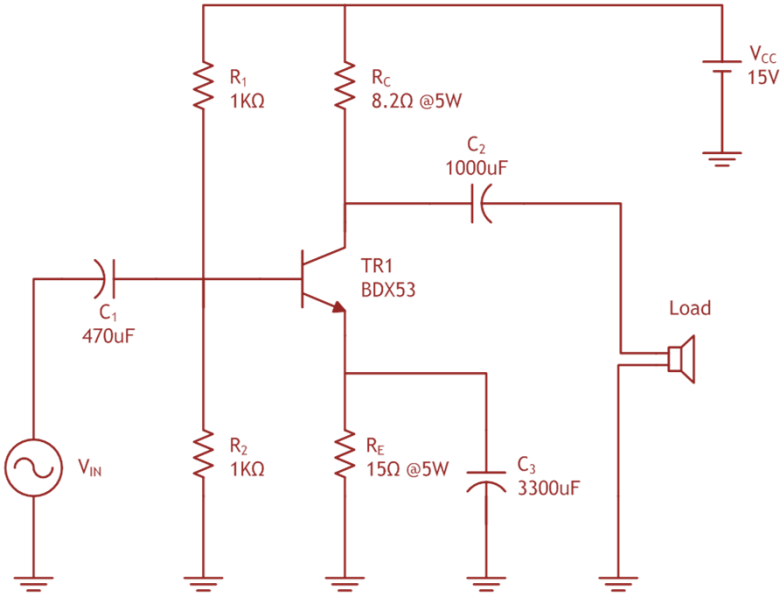
$$M_{pp} = 2\, V_{CEq} = 2\, I_{Cq}\, r_C$$

Circuito equivalente de c.a.
Cálculos modelo en R
Cálculos modelo en π

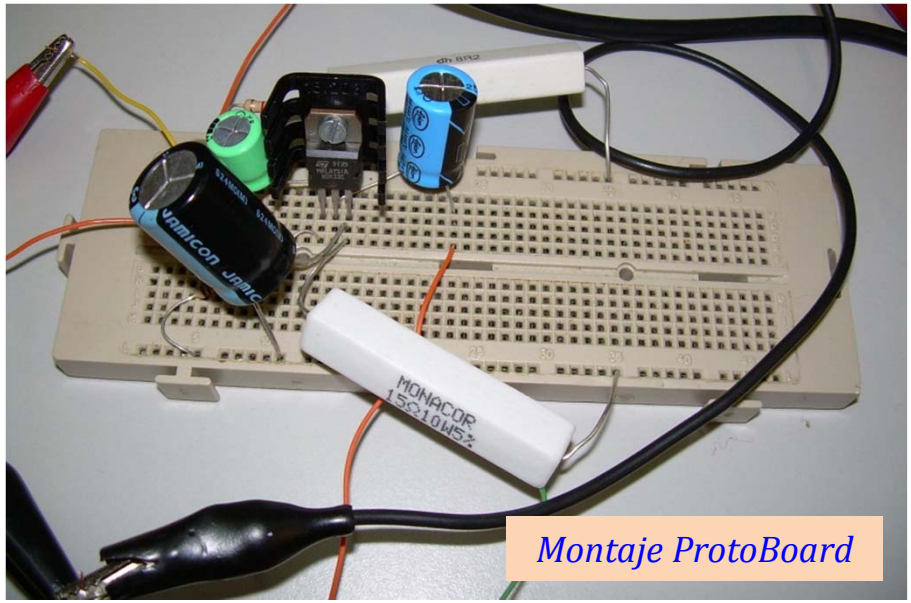
a) Etapa amplificadora con transistor



a) Etapa amplificadora con transistor

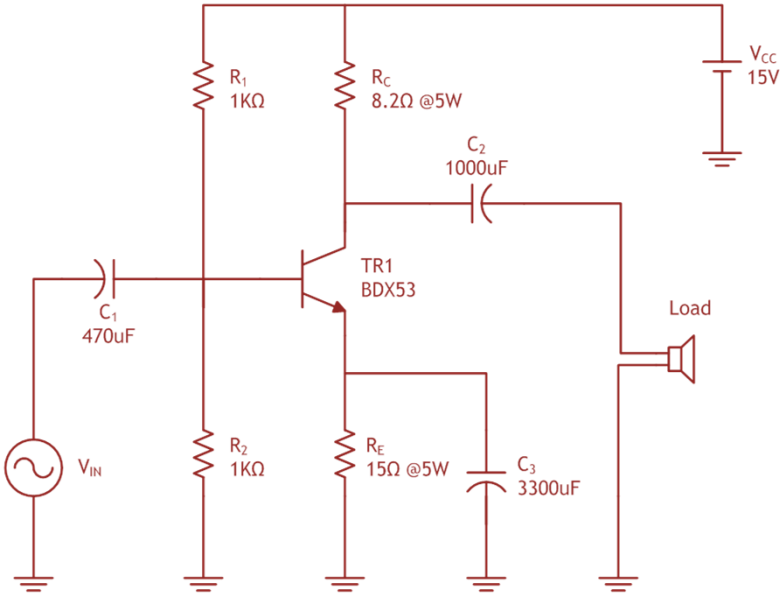


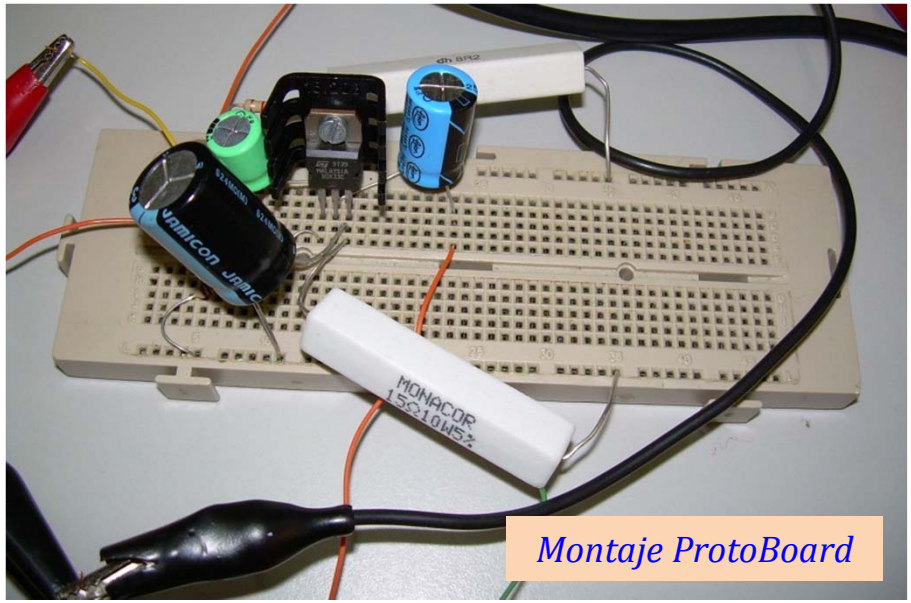
Circuito de partida



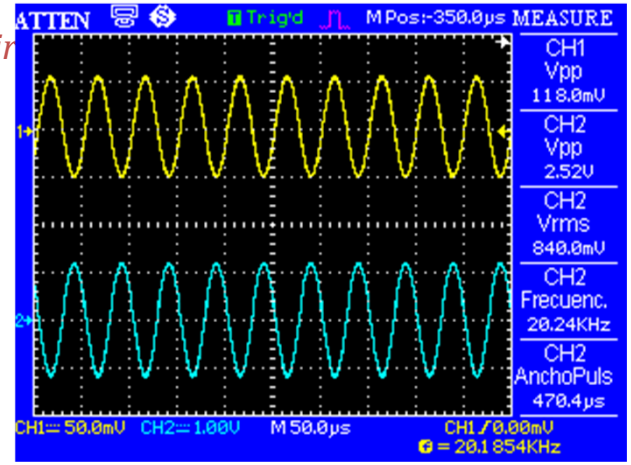
Montaje ProtoBoard

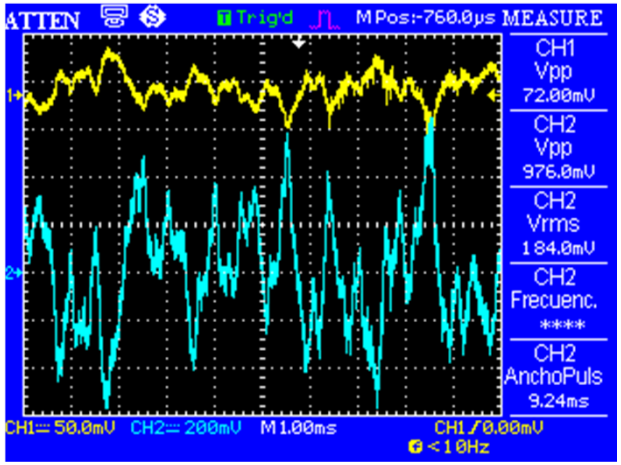
a) Etapa amplificadora con transistor



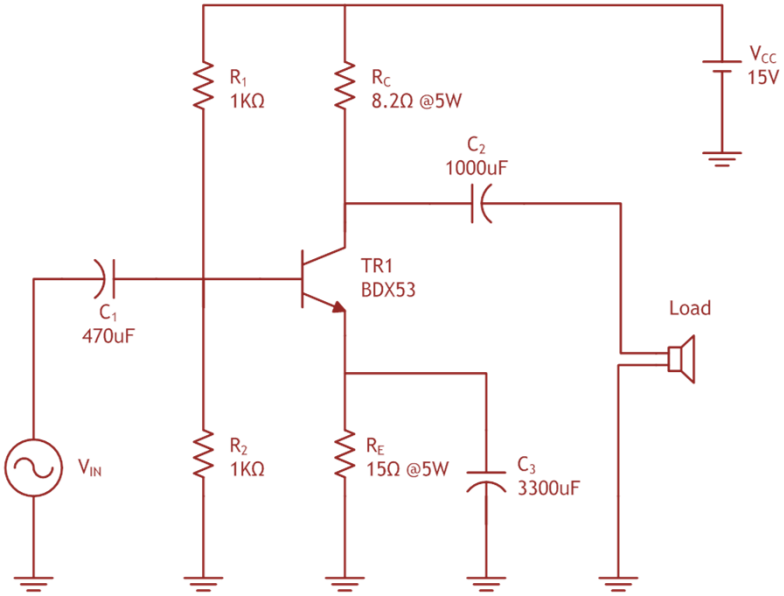


Cir

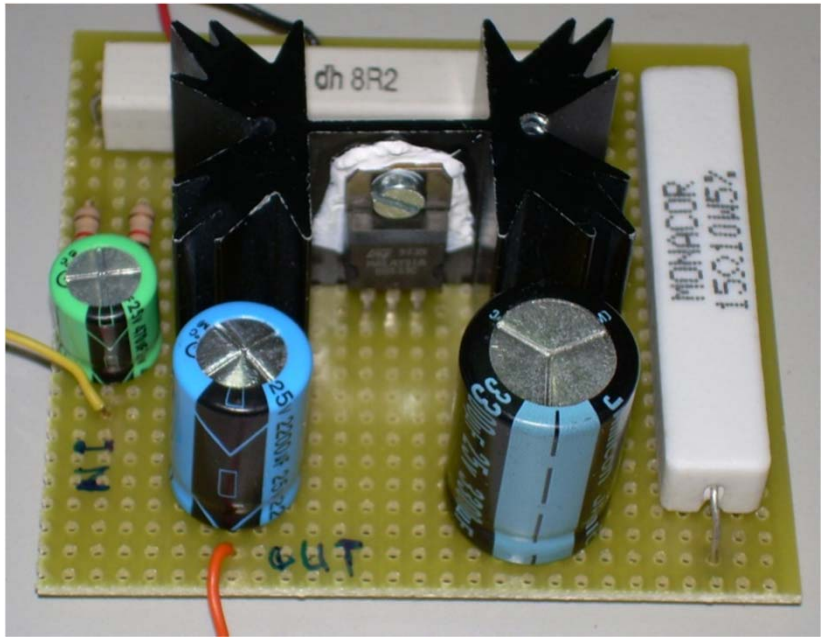




a) Etapa amplificadora con transistor



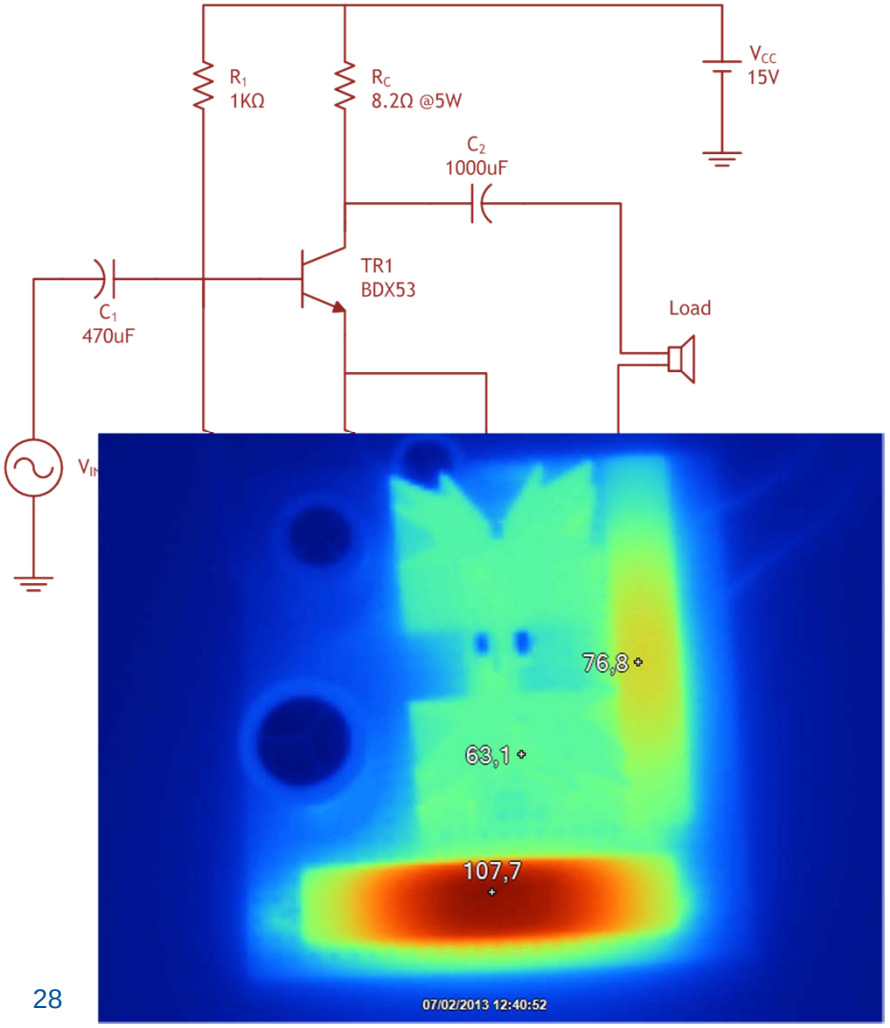
Circuito de partida



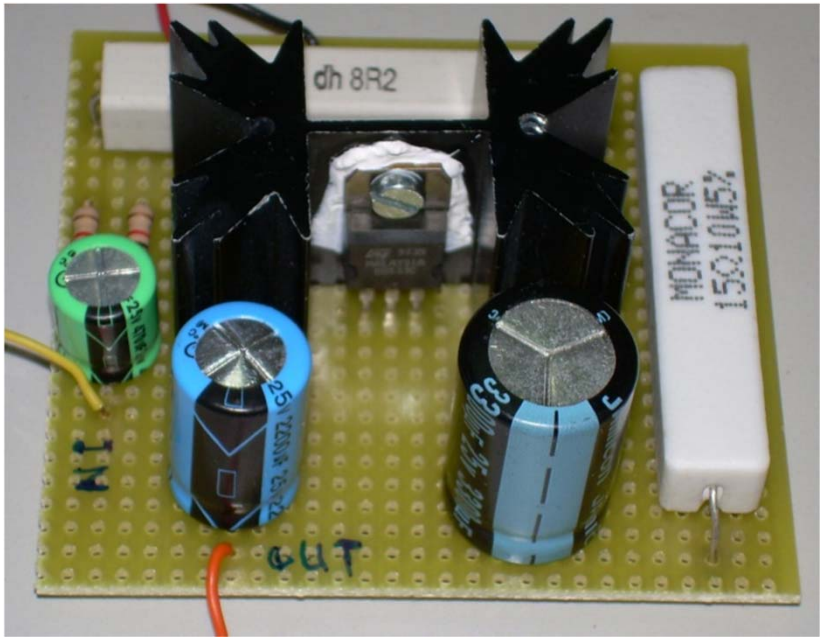
Prototipo definitivo

V_{CC} = 15V @ 0.4A
Punto Q = 5.2V @ 0.41A
V_{IN} = 106mV_{PP}
V_{OUT} = 2.7V_{PP}
V_{OUT} = 840mV_{ef}
G_V = 26
BW = 1KHz ⟶ 105KHz

a) Etapa amplificadora con transistor



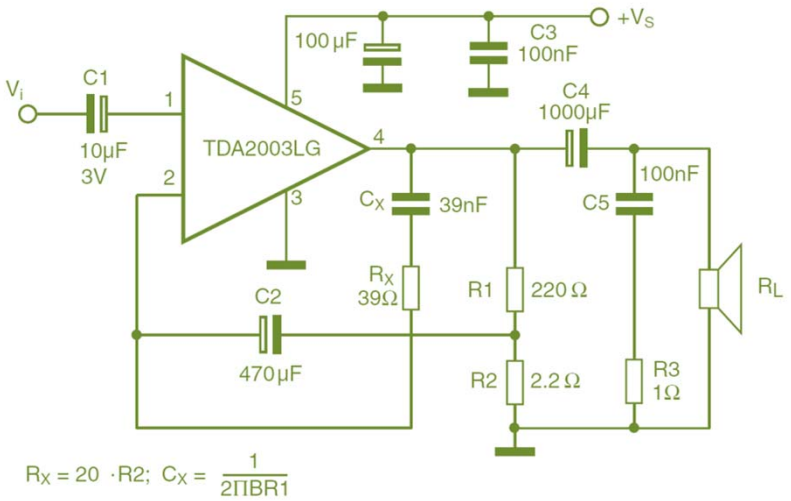
Análisis termográfico



Prototipo definitivo

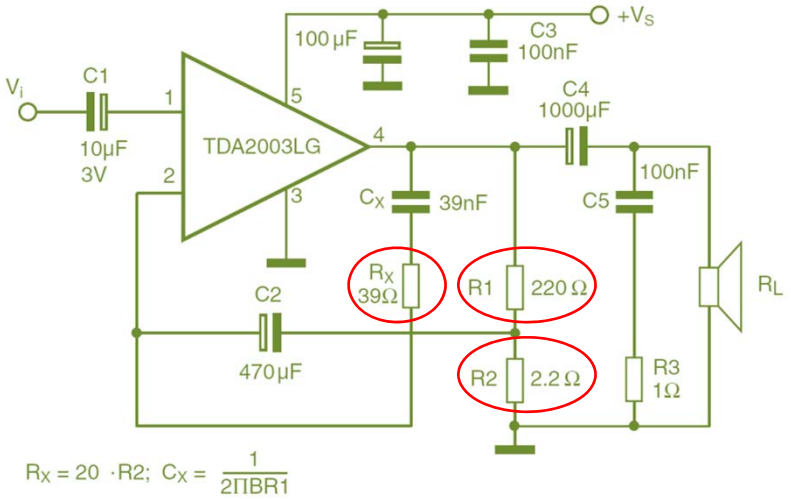
V_{CC} = 15V @ 0.4A
Punto Q = 5.2V @ 0.41A
V_{IN} = 106mV_{PP}
V_{OUT} = 2.7V_{PP}
V_{OUT} = 840mV_{ef}
G_V = 26
BW = 1KHz ⟶ 105KHz

b) Etapa amplificadora con Circuito Integrado



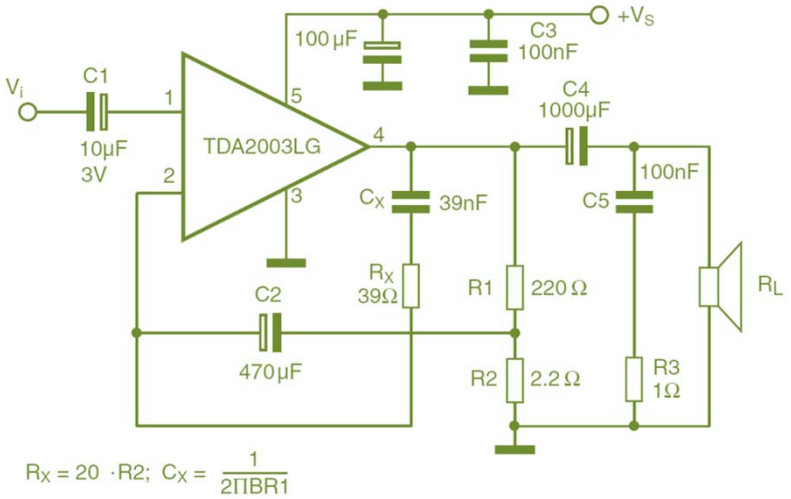
Circuito de partida

b) Etapa amplificadora con Circuito Integrado

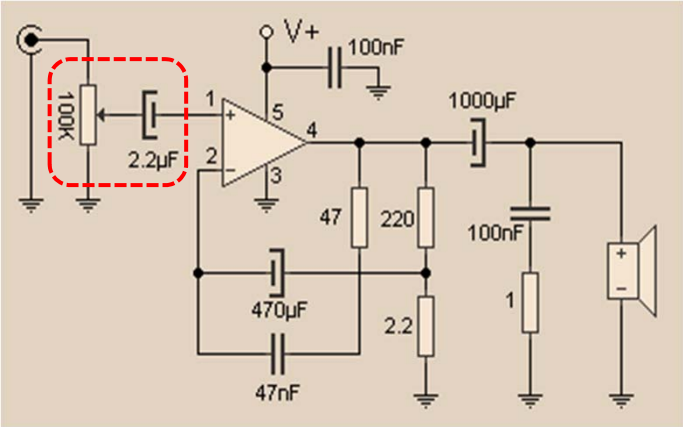


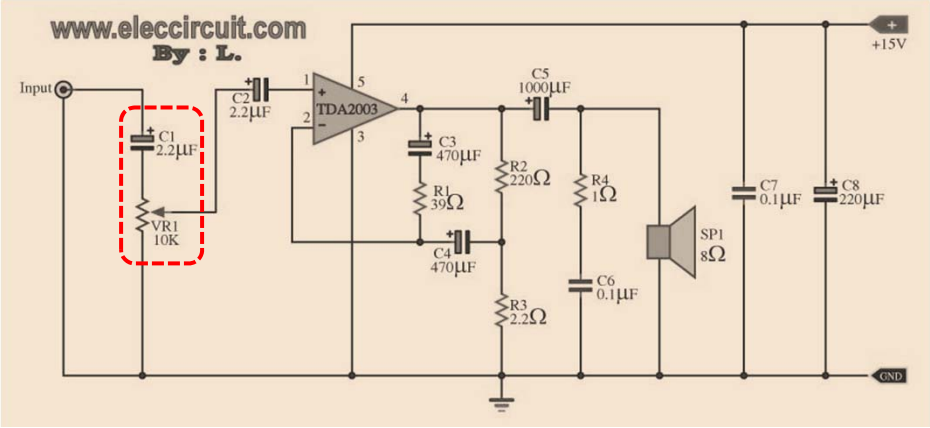
Circuito de partida

b) Etapa amplificadora con Circuito Integrado



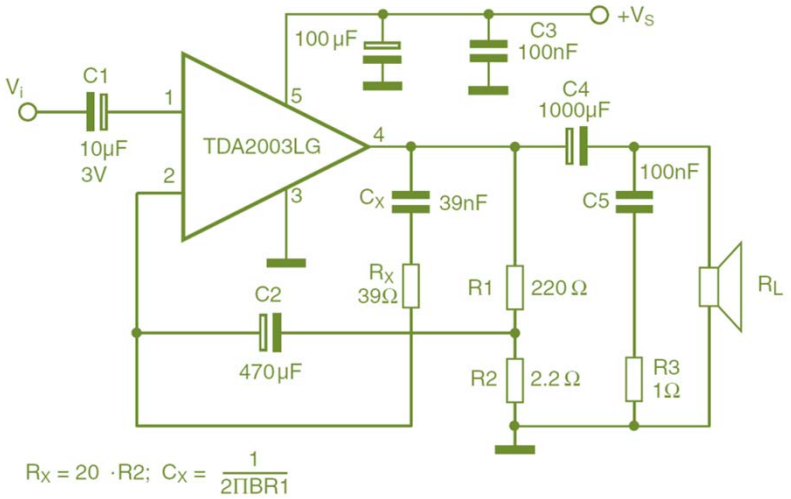
Circuito de partida



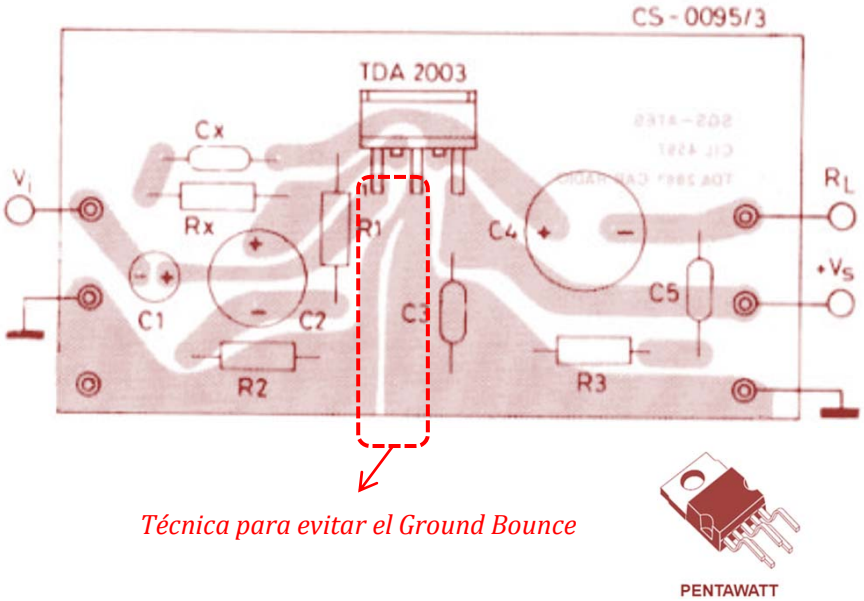


Modificaciones para el control de volumen

b) Etapa amplificadora con Circuito Integrado

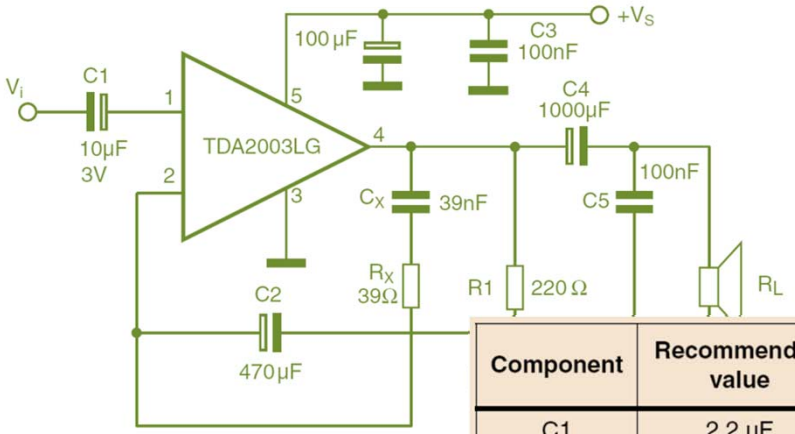


Circuito de partida

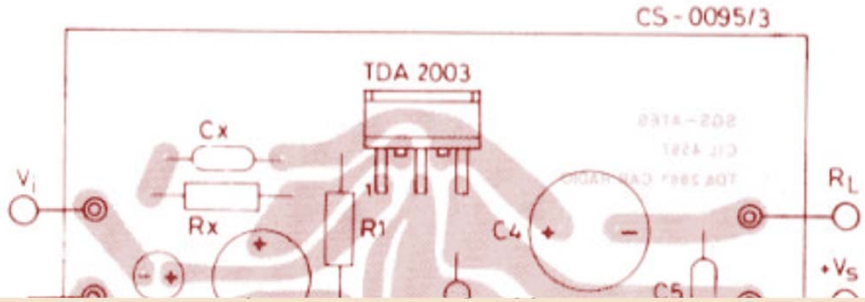


Disposición PCB del fabricante

b) Etapa amplificadora con Circuito Integrado



$R_X = 20 \cdot R2;\ C_X = \frac{1}{2\Pi BR1}$



Circuito de parti

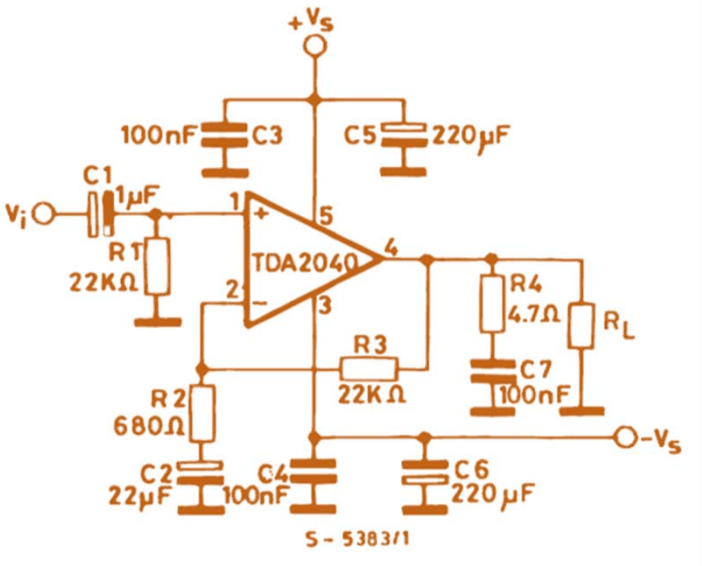
Component	Recommended value	Purpose	Larger than recommended value	Smaller than recommended value C1
C1	2.2 µF	Input DC decoupling	-	Noise at switch-on, switch-off
C2	470 µF	Ripple rejection	-	Degradation of SVR
C3	0.1 µF	Supply bypassing	-	Danger of oscillation
C4	1000 µF	Output coupling to load	-	Higher low frequency cutoff
C5	0.1 µF	Frequency stability	-	Danger of oscillation at high frequencies with inductive loads
C_X	$\cong \frac{1}{2\pi BR1}$	Upper frequency cutoff	Lower bandwidth	Larger bandwidth
R1	(Gv-1). R2	Setting of gain	-	Increase of drain current
R2	2.2 Ω	Setting of gain and SVR	Degradation of SVR	-
R3	1 Ω	Frequency stability	Danger of oscillation at high frequencies with inductive loads	-
R_x	≅ 20 R2	Upper frequency cutoff	Poor high frequency attenuation	Danger of oscillation

B = Frecuencia de respuesta (-3dB)
$R_L = 4\Omega$, $P_O = 1W$
Freq. = 40-15.000Hz

1) B = 18.5kHz. $G_V = 100.\ R_2$
2) R_X y R_1
3) C_X

SVR = Supply Voltage Rejection

b) Etapa amplificadora con mayor potencia

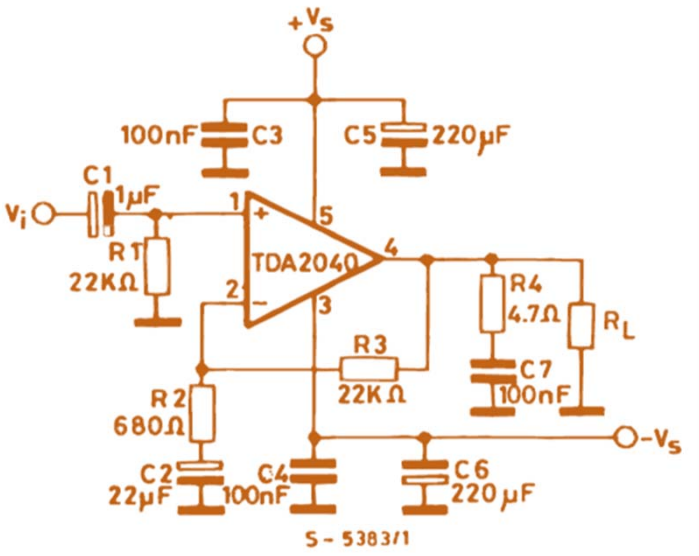


Amplificador 20W

Serie TDA

- *TDA 2002* *8W Mono*
- *TDA 2003* *10W Mono*
- *TDA 2004* *10W Estéreo*
- *TDA 2005* *10W+10W (20W Bridge)*
- *TDA 2040* *20W Mono Hi-Fi (0,4%THD)*

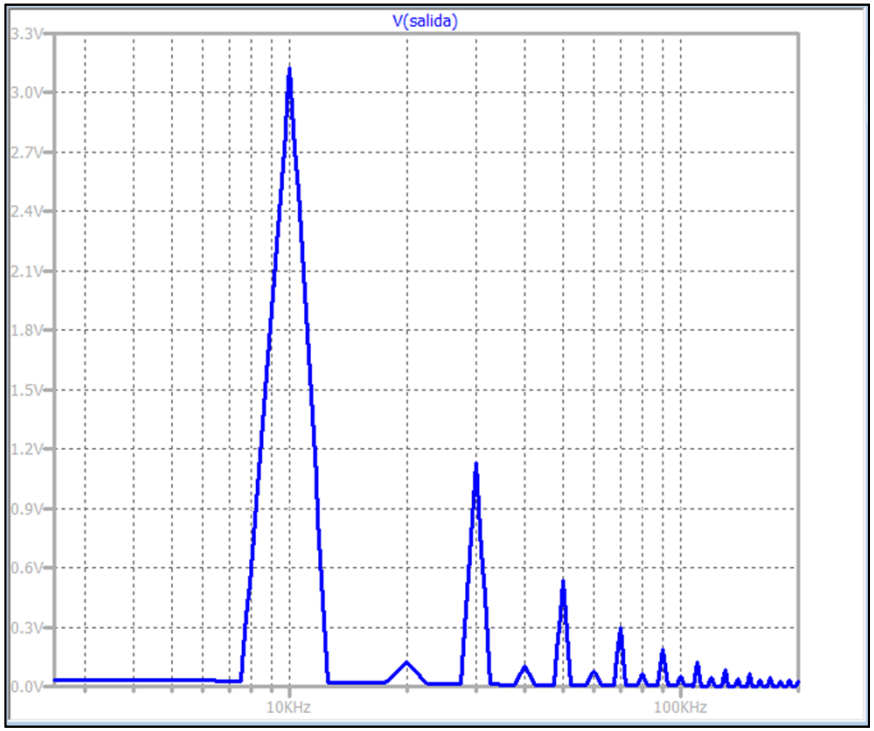
b) Etapa amplificadora con mayor potencia



Amplificador 20W

$$\text{THD} = \frac{\sum \text{Potencia de los armonicos}}{\text{Potencia de la frecuencia fundamental}}$$

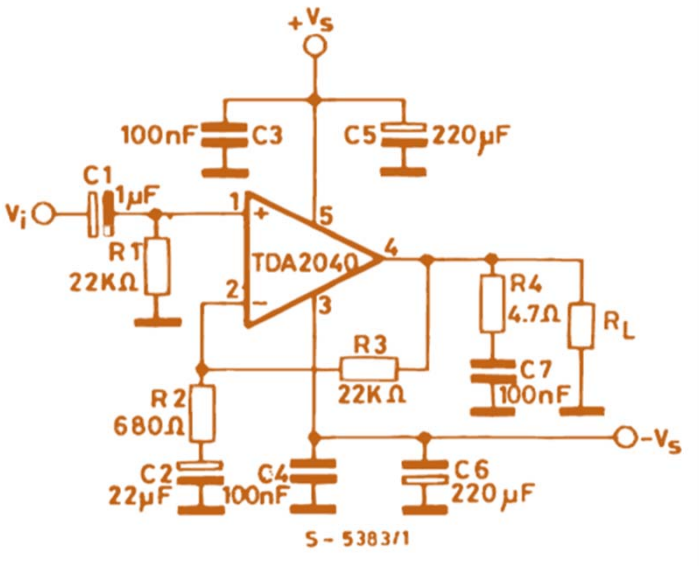
Total Harmonic Distorsion



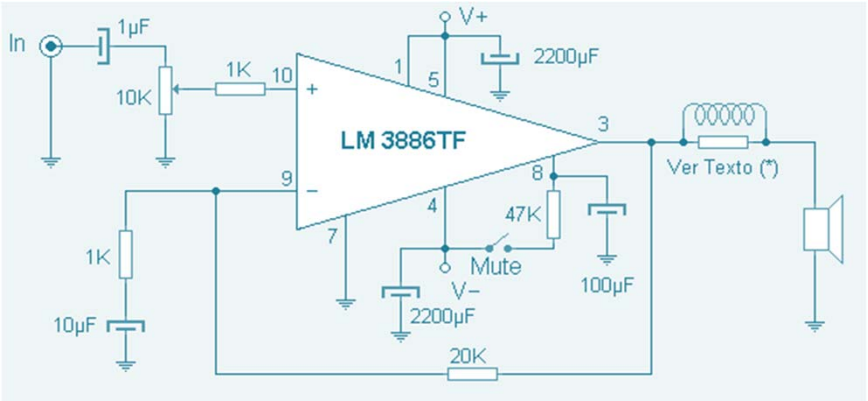
Serie TDA

- *TDA 2002* *8W Mono*
- *TDA 2003* *10W Mono*
- *TDA 2004* *10W Estéreo*
- *TDA 2005* *10W+10W (20W Bridge)*
- *TDA 2040* *20W Mono Hi-Fi (0,4%THD)*

b) Etapa amplificadora con mayor potencia

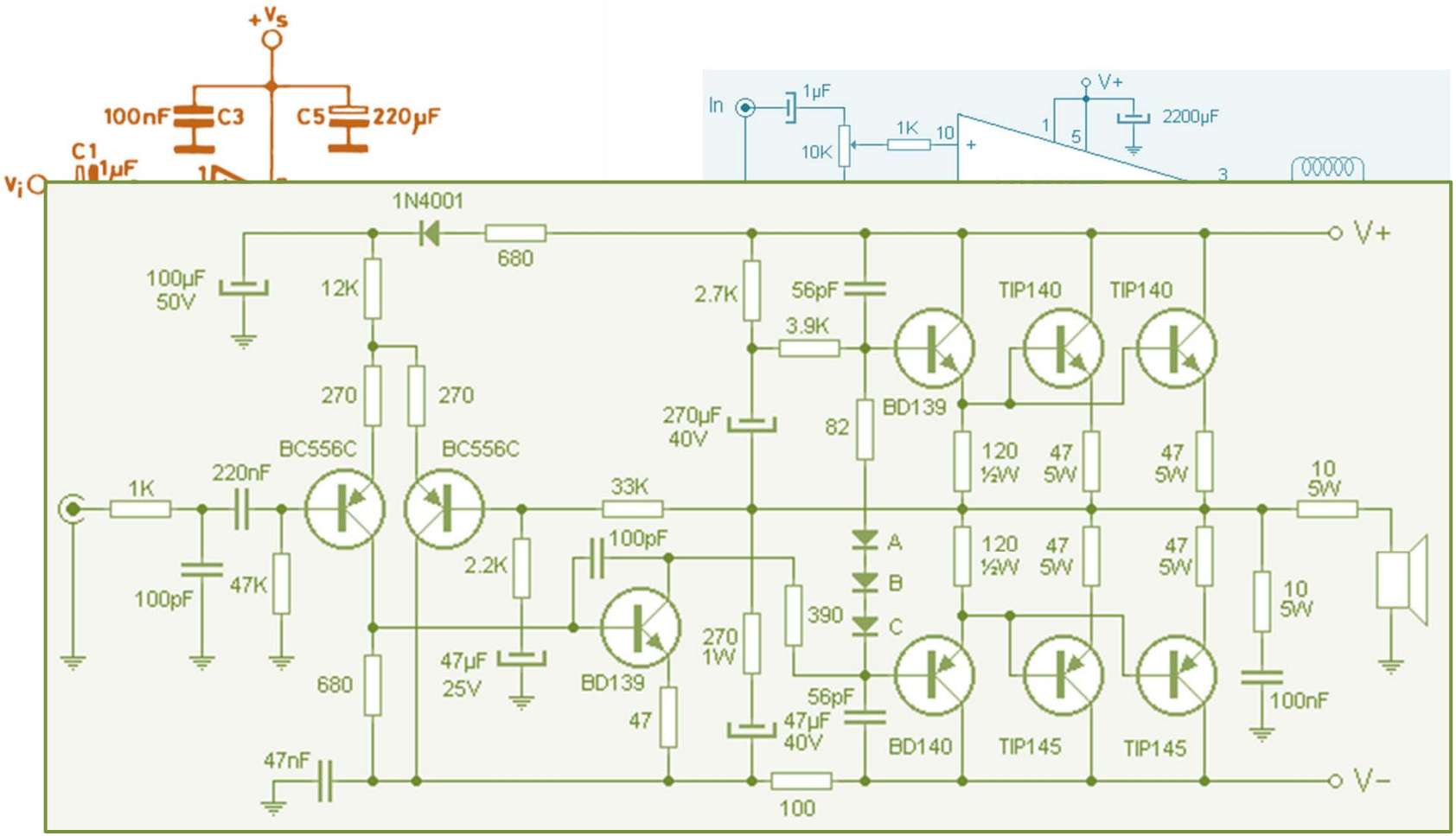


Amplificador 20W



Amplificador 50W

b) Etapa amplificadora con mayor potencia



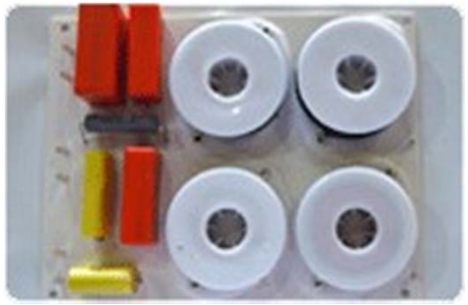
Amplificador 260W

c) Etapa amplificadora comercial

5 W @ 230 V - Mono Power Stage

- Alimentación 220Vcc.
- Impedancia entrada 100 KΩ.
- Impedancia salida 4 u 8 Ω.
- Medidas 110 x 60 x 35mm.
- Peso 270gr.

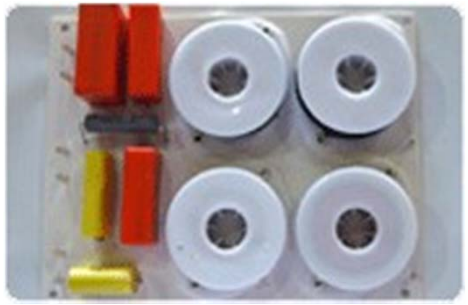
d) Filtros de cruce pasivos



BEYMA 3V Hi-Fi

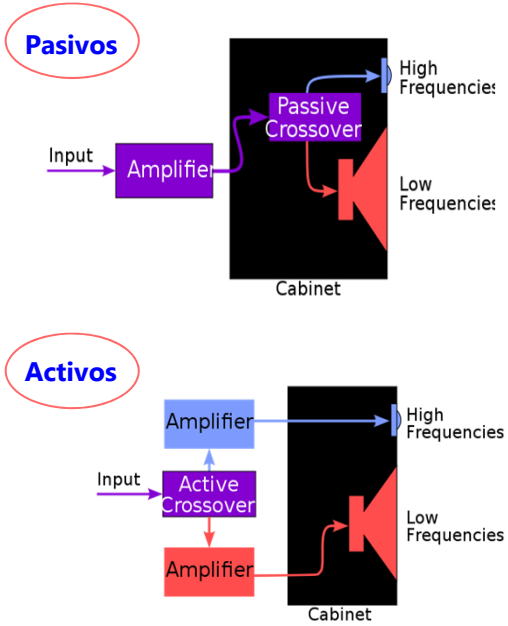
Tipo:	3 vías
Frecuencia Cruce:	800-5000Hz
Potencia admisible:	300WRMS
Impedancia BF:	8Ω
Impedancia HF:	8Ω
Pendiente:	12, 12 y 6dB/oct
Atenuación HF:	0 dB

d) Filtros de cruce pasivos

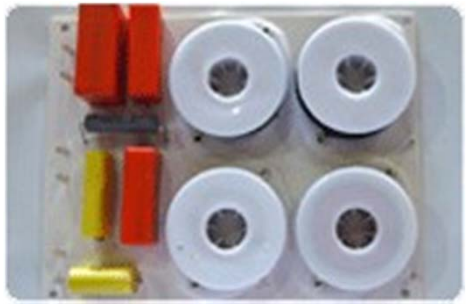


BEYMA 3V Hi-Fi

Tipo:	3 vías
Frecuencia Cruce:	800-5000Hz
Potencia admisible:	300WRMS
Impedancia BF:	8Ω
Impedancia HF:	8Ω
Pendiente:	12, 12 y 6dB/oct
Atenuación HF:	0 dB

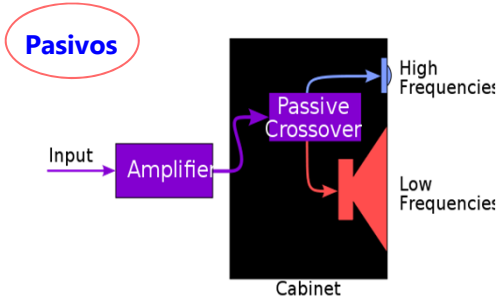


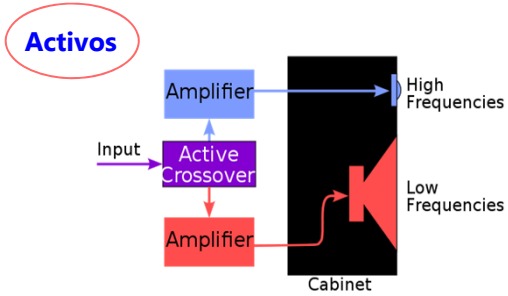
d) Filtros de cruce pasivos



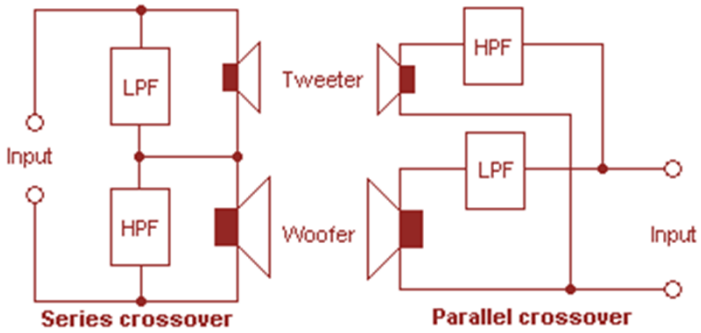
BEYMA 3V Hi-Fi

Tipo:	3 vías
Frecuencia Cruce:	800-5000Hz
Potencia admisible:	300WRMS
Impedancia BF:	8Ω
Impedancia HF:	8Ω
Pendiente:	12, 12 y 6dB/oct
Atenuación HF:	0 dB

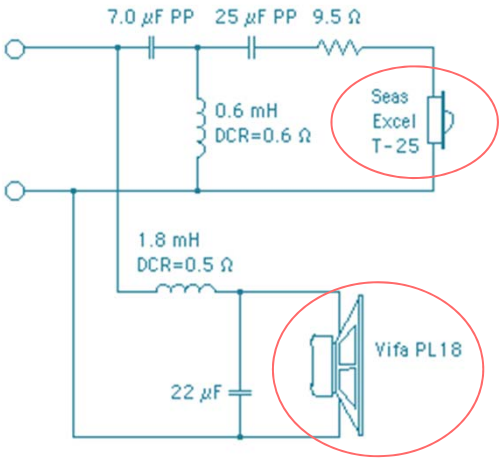




Basados en la topología del circuito

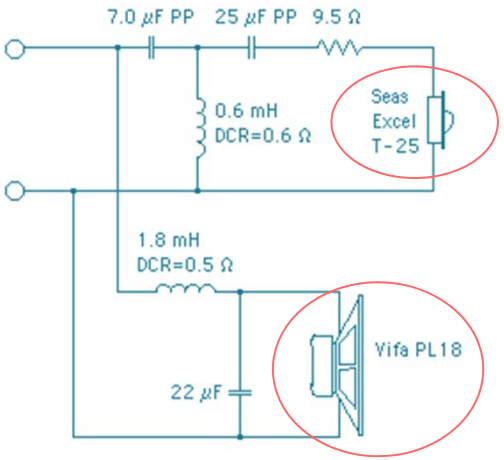


d) Filtros de cruce pasivos **(Concurso DIY2000 Speakers)**

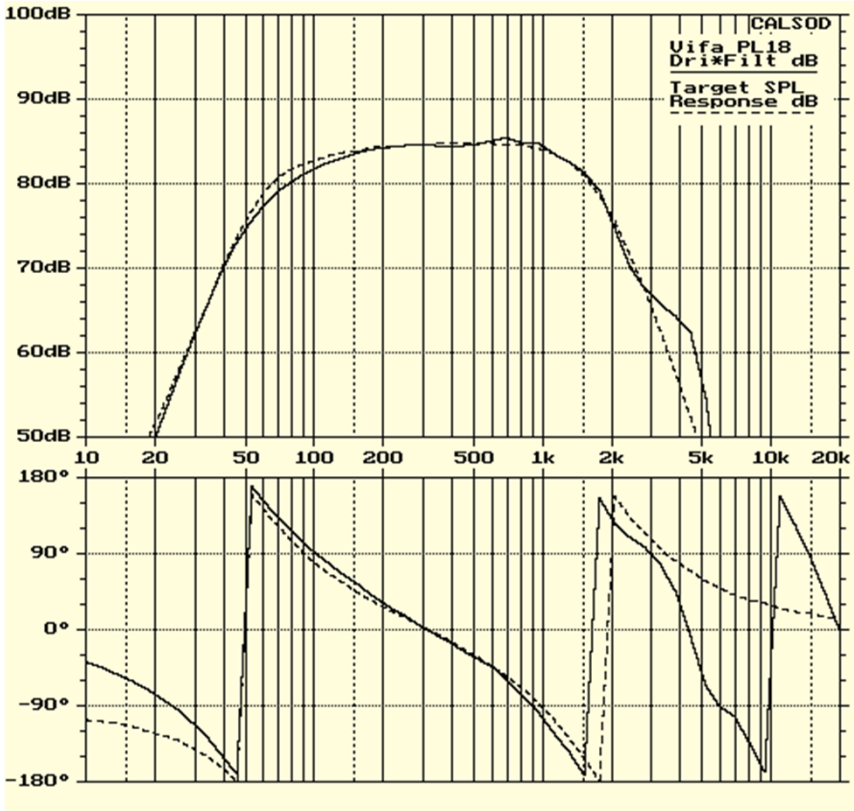


Crossover Pasivo-Paralelo

d) Filtros de cruce pasivos (Concurso DIY2000 Speakers)



Crossover Pasivo-Paralelo



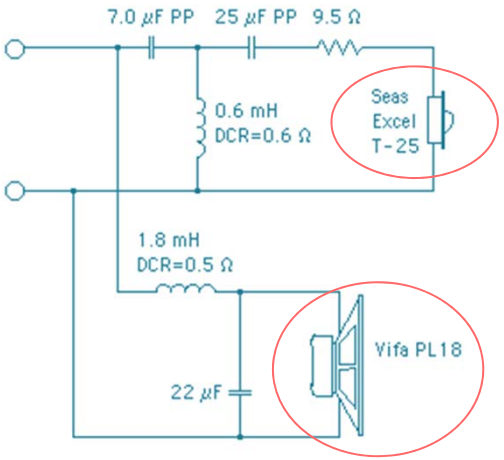
Bode de amplitud y fase
Woofer

Software diseño de Baffles

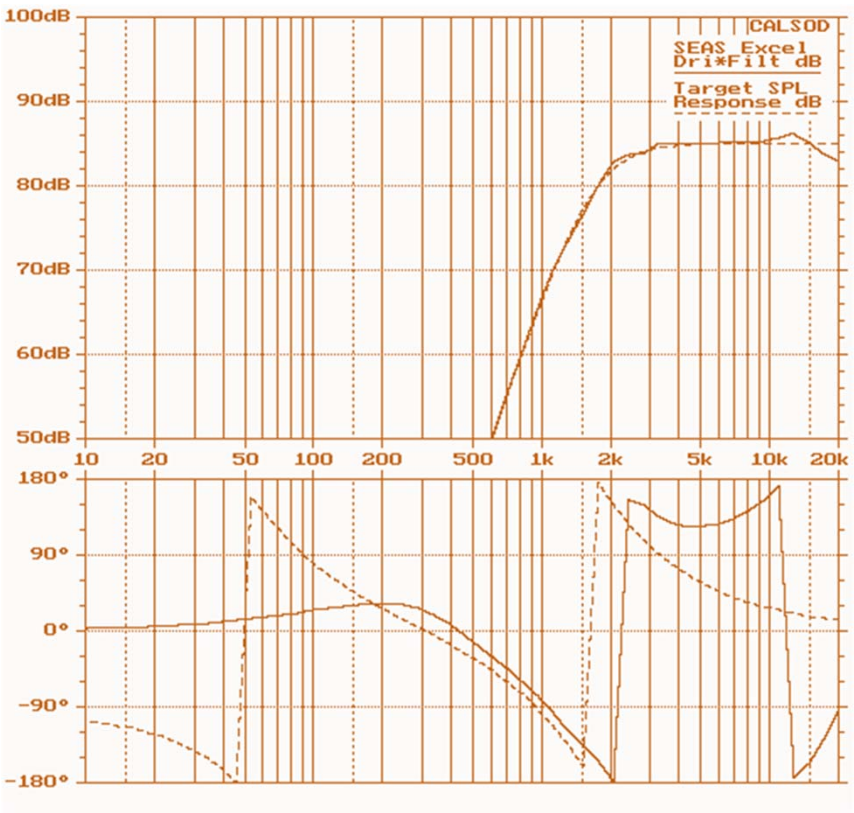
CALSOD
(Computer Aided Loudspeaker Optimization and Design software, by *Audiosoft*), Melbourne, Australia.

LspCAD
IJData (*Ingemar Johansson*), Luleå, SWEDEN.
www.ijdata.com

d) Filtros de cruce pasivos (Concurso DIY2000 Speakers)



Crossover Pasivo-Paralelo



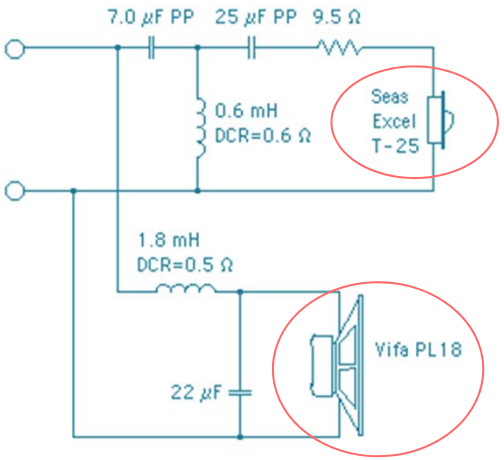
Bode de amplitud y fase
Tweeter

Software diseño de Baffles

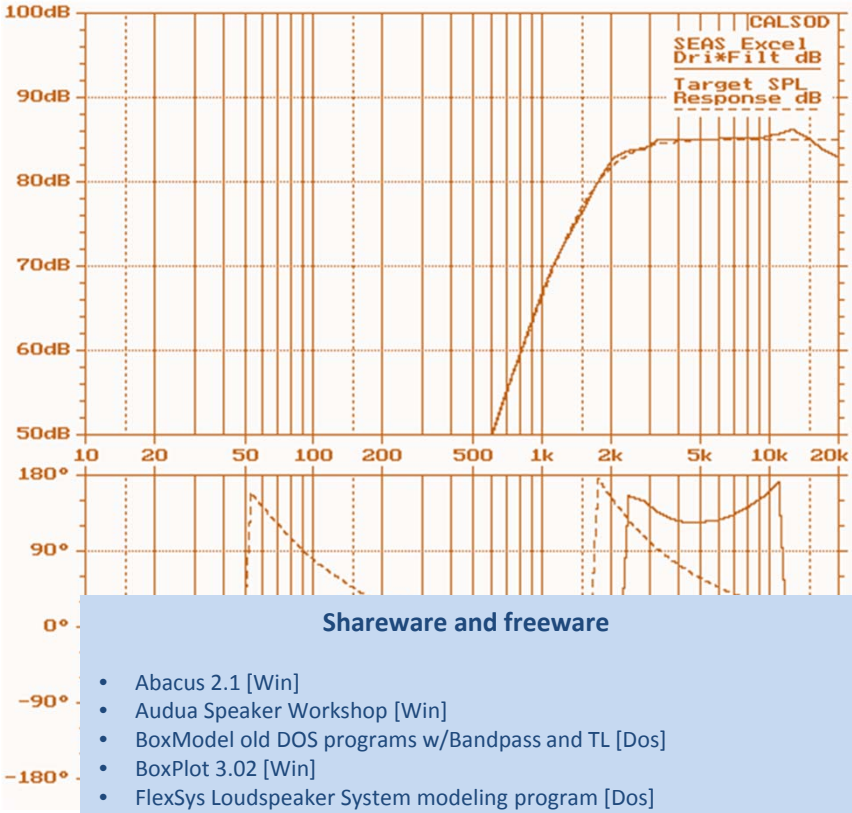
CALSOD
(Computer Aided Loudspeaker Optimization and Design software, by *Audiosoft*), Melbourne, Australia.

LspCAD
IJData (*Ingemar Johansson*), Luleå, SWEDEN.
www.ijdata.com

d) Filtros de cruce pasivos (Concurso DIY2000 Speakers)



Crossover Pasivo-Paralelo



Software diseño de Baffles

CALSOD
(Computer Aided Loudspeaker Optimization and Design software, by *Audiosoft*), Melbourne, Australia.

LspCAD
IJData (*Ingemar Johansson*), Luleå, SWEDEN.
www.ijdata.com

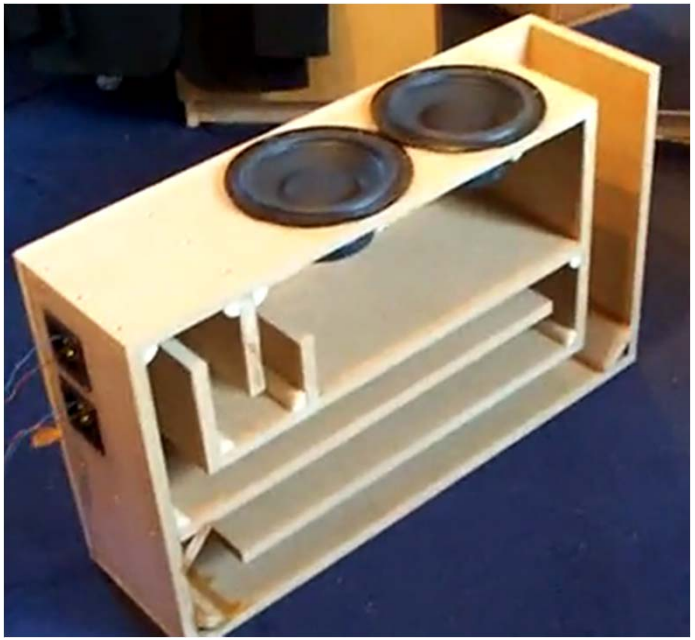
Shareware and freeware

- Abacus 2.1 [Win]
- Audua Speaker Workshop [Win]
- BoxModel old DOS programs w/Bandpass and TL [Dos]
- BoxPlot 3.02 [Win]
- FlexSys Loudspeaker System modeling program [Dos]
- Loudspeaker Design 3.00 [Dos]
- Loudspeaker Modeling Program v2.15 [Dos]
- lspCAD Lite [Win]
- MacSpeaker 1.6 [Mac]
- Perfect Box 4.5 [Dos]
- System Simulator and a Delay Lattice calculator
- WinISD [Win]
- Winsub Subwoofer Designer [Win]

e) Cajas acústicas

1

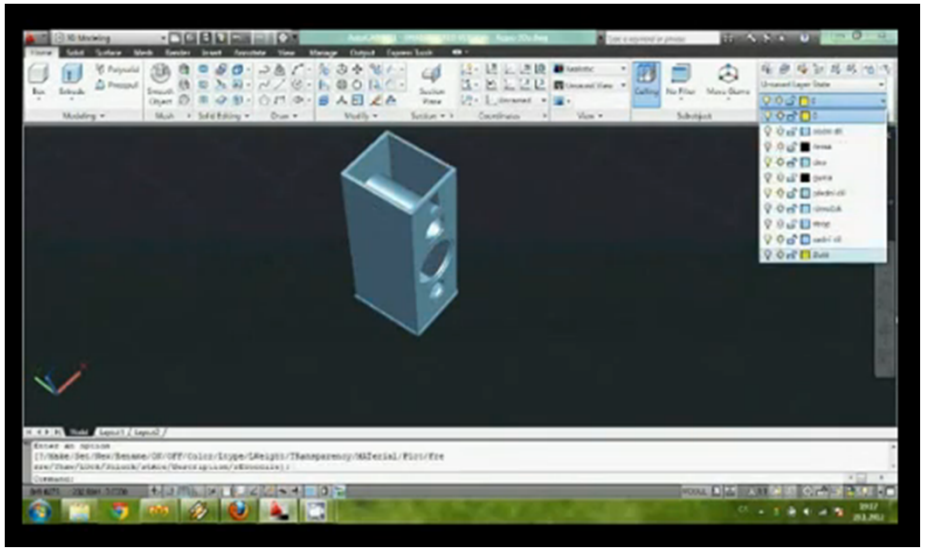
2

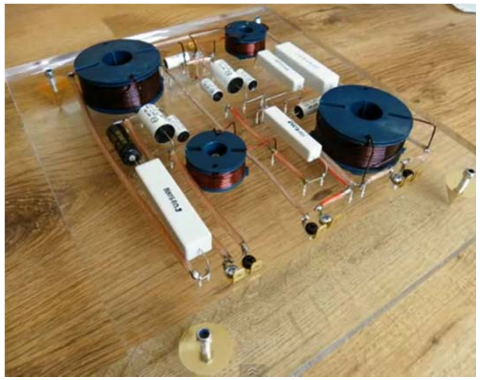


3

4

e) Cajas acústicas y II





Normativa

Underwriters Laboratories

Canadian Standards Association

VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.
Association for Electrical, Electronic & Information Technologies

La Marca CE proviene del francés y significa "Conformité Européenne" o de **Conformidad Europea** y es una marca europea para ciertos grupos de servicios o productos industriales. Se apoya en la **directiva 93/68/EEC**.

Fue establecida por la Comunidad Europea y es el testimonio por parte del fabricante de que su producto cumple con los mínimos requisitos legales y técnicos en materia de seguridad de los Estados miembros de la Unión Europea. Se debe tener presente que la marca CE **no implica la calidad del producto**.