

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

**AMPLIFICADOR DE RADRIOFRECUENCIA
(RADIOFREQUENCY AMPLIFIER)**

Para acceder al Título de

Graduado en

Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación

Autor: Ana María Vicario Arroyo

10 - 2014

TÍTULO	AMPLIFICADOR DE RADIOFRECUENCIA (RADIOFREQUENCY AMPLIFIER)			
AUTOR	Ana María Vicario Arroyo			
DIRECTOR	Pablo Pedro Sánchez Espeso			
TITULACIÓN	GRADUADO EN INGENIERIA DE TECNOLOGIAS DE TELECOMUNICACIÓN	FECHA	10-2014	TOMO I DE I

**GRADUADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE
TELECOMUNICACIÓN**

CALIFICACIÓN DEL TRABAJO FIN DE GRADO

Realizado por: Ana María Vicario Arroyo

Director del TFG: Pablo Pedro Sánchez Espeso

Título: “Amplificador de Radiofrecuencia”

Title: “Radiofrequency Amplifier”

Presentado a examen el día: 13 de Octubre de 2014

para acceder al Título de

**GRADUADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE
TELECOMUNICACIÓN**

Composición del Tribunal:

Presidente (Apellidos, Nombre): Sanchez, Pablo

Secretario (Apellidos, Nombre): Posadas, Hector

Vocal (Apellidos, Nombre): Fernandez, Victor

Este Tribunal ha resuelto otorgar la calificación de:

Fdo.: El Presidente

Fdo.: El Secretario

Fdo.: El Vocal

Fdo.: El Director del TFG
(sólo si es distinto del Secretario)

Vº Bº del Subdirector

Trabajo Fin de Grado Nº
(a asignar por Secretaría)

*Gracias a Rubén, Hugo y Lucas.
Que no me falte nunca vuestro aliento
que hace que se mueva el mundo
y que todo sea posible...*

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	8
2.	REQUERIMIENTOS	8
3.	OBJETO	9
3.1	Amplificador de Radiofrecuencia	9
3.1.1	Características de los amplificadores de radiofrecuencia.....	9
3.2	Fuente de Alimentación	10
3.2.1	Fuentes de Alimentación Lineales.....	11
3.2.2	Fuentes de Alimentación Conmutadas	11
3.2.3	Características de las Fuentes de alimentación.....	11
4.	DISEÑO	12
4.1	Amplificador de RF	12
4.1.1	Tecnología del amplificador de radiofrecuencia	17
4.2	Fuente de Alimentación	18
4.2.1	Esquema de bloques de la fuente de alimentación	18
4.2.2	Descripción del regulador LT1935	19
4.2.3	Operación del regulador LT1935	21
4.2.4	Selección de componentes para la fuente	22
4.2.5	Simulaciones para el regulador LT1935.....	24
5.	ESQUEMÁTICO	30
6.	LAYOUT.....	33
7.	SISTEMA MECÁNICO.....	35
8.	PRESUPUESTO.....	38
8.1	Gastos recurrentes.....	38
8.2	Gastos no recurrentes.....	39
8.3	Precio de venta del amplificador.....	39
9.	CONCLUSIONES.....	41

FIGURAS

Figura 1. Esquema de simulación para el amplificador de RF	13
Figura 2. Simulación de parámetros S del amplificador de RF	14
Figura 3. Simulación de balance armónico a 72MHz	15
Figura 4. Simulación de balance armónico a 156MHz	16
Figura 5. Simulación consumo para la frecuencia de 72 MHz	17
Figura 6. Simulación consumo para la frecuencia de 156 MHz	17
Figura 7. Esquema de la fuente de alimentación	18
Figura 8. Esquemático básico para la fuente de alimentación	19
Figura 9. Esquemático interno del LT1935	21
Figura 10. Sistema de arranque suave	24
Figura 11. Esquema de simulación de fuente alimentación simplificado.	25
Figura 12. Simulación temporal de V_{OUT} , I_{IN} , I_{OUT}	25
Figura 13. TTF de la corriente de entrada	26
Figura 14. Esquema de simulación completo	26
Figura 15. Simulación temporal de V_{OUT} , I_{IN} , I_{OUT} definitiva.....	27
Figura 16. Comparativa de V_{OUT} con y sin circuito de arranque suave	28
Figura 17. Simulación de rizado en tensión de salida.....	28
Figura 18. <i>TTF de la corriente de entrada definitiva</i>	29
Figura 19. <i>Rizado de corriente de salida</i>	30
Figura 20. Pantalla de LAYOUT EAGLE.....	31
Figura 21. Impedancia de línea	31
Figura 22. Esquemático del sistema completo	32
Figura 23. <i>Top Layout</i>	33
Figura 24. <i>Bottom Layout</i>	33
Figura 25. <i>Layout completo</i>	34
Figura 26. <i>Sistema mecánico completo</i>	35
Figura 27. <i>Sistema mecánico abierto</i>	35
Figura 28. <i>Vista superior del sistema mecánico con PCB</i>	36
Figura 29. <i>Planos del sistema mecánico</i>	37

TABLAS

Tabla 1. <i>Especificaciones del amplificador</i>	8
Tabla 2. <i>Especificaciones de la Fuente de Alimentación</i>	18
Tabla 3. <i>Gastos recurrentes</i>	38
Tabla 4. <i>Gastos no recurrentes</i>	39

1. INTRODUCCIÓN

En el presente proyecto se describe el desarrollo de un amplificador de radiofrecuencia incluyendo la fuente de alimentación que le proporciona las tensiones adecuadas para su correcta operación.

Dicho amplificador trabajará en la banda de VHF y con una entrada de alimentación general de 5 V_{DC}, la potencia de salida mínima deberá ser superior a 0.6W en todo el rango de frecuencia.

2. REQUERIMIENTOS

La siguiente tabla muestra las especificaciones mínimas esperadas para el producto que se desarrolla en este proyecto.

PARÁMETRO	VALOR	UNIDADES	COMENTARIOS
Frecuencia	72 - 156	MHz	
Potencia a 72 MHz	2	W	Equivalente a 33 dBm
Potencia a 156 MHz	0.6	W	Equivalente a 27.8 dBm
Impedancia entrada / salida	50	Ω	
Armónicos	< -30	dBm	
Rango de temperatura de operación	-10 a 55	°C	
Alimentación	5	VDC	
Eficiencia en 2W	>20	%	Figura de mérito
Encendido del sistema	0 / OPEN		Mediante un pin al aire, puesto a masa el sistema se apaga.
Consumo máximo del sistema	10	W	
Tamaño	110 x 110 x 30	mm	
Peso	< 0.5	Kg	

Tabla 1. Especificaciones del amplificador

3. OBJETO

El objetivo del presente proyecto es el diseño de un sistema compuesto por un amplificador de radiofrecuencia con las especificaciones mencionadas en la tabla anterior, y por la fuente de alimentación necesaria para su funcionamiento en cumplimiento con los requisitos.

Los siguientes puntos describen las pautas en el diseño del presente proyecto:

- La correcta comprensión de las especificaciones requeridas.
- El diseño del esquemático correspondiente.
- La realización de las simulaciones pertinentes.
- El diseño del PCB y todos los elementos necesarios para la fabricación de dicho sistema.
- El diseño del sistema mecánico correspondiente que soporte los elementos anteriores.
- El cálculo de los costes del equipo
- Las conclusiones pertinentes.

3.1 Amplificador de Radiofrecuencia

Un amplificador de radiofrecuencia es un dispositivo que puede proporcionar en su salida una señal eléctrica (en este caso de radiofrecuencia) de mayor nivel que en su entrada. Los amplificadores de radiofrecuencia en la actualidad se basan casi exclusivamente en elementos semiconductores como son los transistores.

3.1.1 Características de los amplificadores de radiofrecuencia

Es posible definir y clasificar los amplificadores de radiofrecuencia mediante una serie de características básicas. Este estudio hace uso de las siguientes características:

- 1. Rango de frecuencias: El intervalo de frecuencia (ciclos por segundo) en el que puede operar el amplificador.*

2. *Ganancia: o relación de transferencia es la relación entre la magnitud eléctrica de salida y de entrada de dicho amplificador.*
3. *Potencia de salida: Es la capacidad del amplificador para transmitir la energía a una carga de salida.*
4. *Eficiencia: Es la relación entre el consumo de energía eléctrica y la que es capaz de entregar a una carga.*
5. *Impedancia entrada y salida: Es la carga óptima de dicho amplificador tanto en la entrada como en la salida.*
6. *Intermodulación: Es la modulación de amplitud de señales no deseadas.*
7. *Rizado: Es la pendiente en la ganancia dentro de la banda del amplificador.*

Además de todas las características anteriormente citadas, los amplificadores poseen otras características debidas a diferentes fenómenos. Dichas características no citadas pueden ser importantes dependiendo del ámbito de aplicación del amplificador. Por ejemplo, para sistemas de recepción de señales la figura de ruido de los amplificadores es un parámetro muy importante ya que de esta medida depende en buena parte la relación señal a ruido del sistema completo.

3.2 Fuente de Alimentación

Una fuente de alimentación es el dispositivo encargado de suministrar la tensión y la corriente necesarias para el correcto funcionamiento de los diferentes componentes de los sistemas electrónicos.

Existen diversos tipos de fuentes de alimentación y estas se pueden clasificar en función de su topología:

- La fuente conmutada
- La fuente lineal

3.2.1 Fuentes de Alimentación Lineales

Estos dispositivos se basan en reguladores lineales que son dispositivos electrónicos que permiten controlar la tensión de salida ajustando continuamente la caída de tensión en un transistor de potencia conectado en serie entre la entrada y la salida. Es decir, operan con una tensión de salida continua, donde el nivel de tensión a la entrada siempre debe ser superior al de salida.

Las ventajas de las fuentes lineales son su sencillez y que generan menos ruido electromagnético. La principal desventaja es su menor eficiencia (disipan más energía en forma de calor que las fuentes conmutadas).

3.2.2 Fuentes de Alimentación Conmutadas

La principal desventaja de la fuente lineal es su eficiencia. Para elevar la eficiencia lo ideal es minimizar las pérdidas en el elemento regulador.

Una fuente conmutada utiliza un transistor en la zona de corte y saturación, esto es conmutando. De esta forma se tienen periodos de tiempo en los que la corriente y la tensión son nulos. Esto se logra convirtiendo la tensión de entrada en una señal cuadrada, siendo este el concepto básico de las fuentes conmutadas.

3.2.3 Características de las Fuentes de alimentación

Las fuentes de alimentación tienen una serie de características que las definen. Entre otras:

1. *Tensión de salida*. Es el voltaje en la salida del circuito.
2. *Corriente de salida*. Es el flujo de carga eléctrica por unidad de tiempo que recorre la carga de salida.
3. *Regulación de carga*. Es la capacidad de la fuente para regular la tensión de salida al valor solicitado independientemente de la corriente.

4. *Rizado de salida*. Es la variación de voltaje de salida en función del tiempo, dicho de otro modo es la componente alterna que posee la función de tensión de salida.

4. DISEÑO

4.1 Amplificador de RF

La topología propuesta para esta banda es la de un amplificador PUSH-PULL. Se elige esta topología dado que el amplificador cubre más de una octava de frecuencia. La eficiencia del amplificador de potencia push-pull es la misma que la del amplificador de potencia single-ended, y la capacidad de potencia de salida del amplificador de potencia push-pull es el doble que la del amplificador de potencia single-ended (3dB superior), con lo que es la topología adecuada en esta situación.

Además, en la disposición push-pull las componentes de corriente continua y armónicos pares se anulan, pero añaden armónicos impares, por lo tanto la salida contiene el tono fundamental y las demás componentes impares deben filtrarse adecuadamente. Para esta banda de frecuencias, con el fin de disminuir dichos componentes armónicos, se ha incluido un filtro de Butterworth en la salida, lo que cual disminuye los armónicos impares a la vez que mejora la adaptación de salida del circuito.

El esquemático completo del sistema sería el que se presenta en la imagen a continuación.

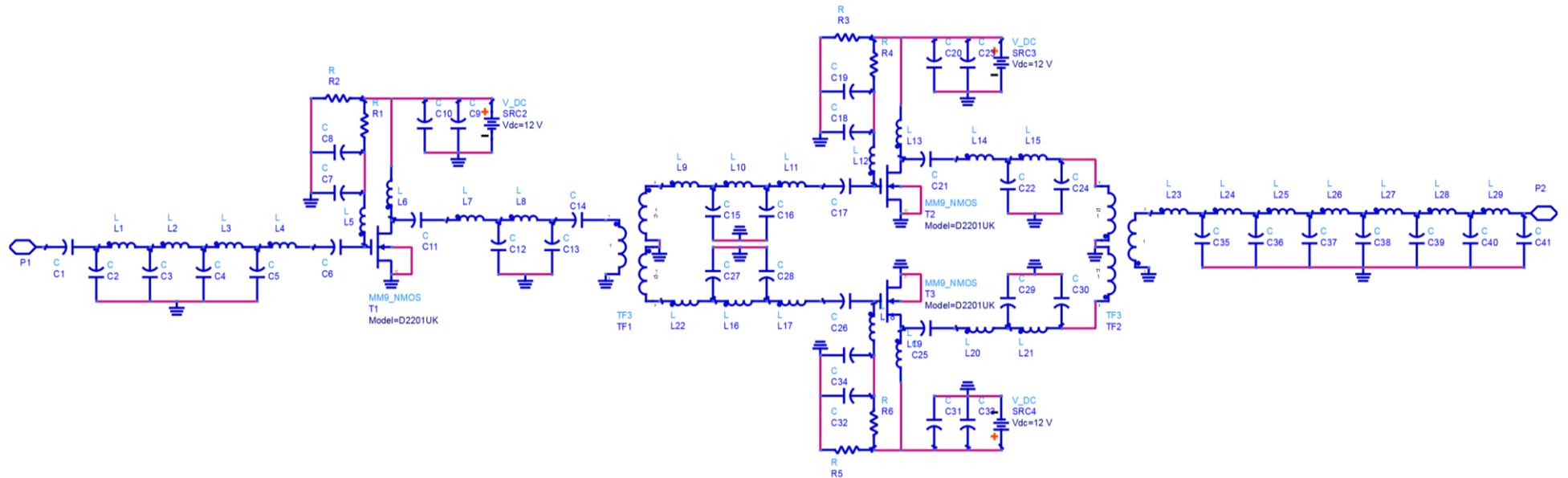


Figura 1. Esquema de simulación para el amplificador de RF

En el esquemático anterior se pueden diferenciar dos etapas de amplificación diferentes: la de entrada que proporciona ganancia al sistema, y la de salida que es la etapa Push-Pull (con dos transistores) que proporciona la potencia de salida deseada. Incorpora además un filtro Butterworth de siete etapas, que a estas frecuencias no incluirá pérdidas excesivas mientras que aportará adaptación y filtrado a las componentes armónicas generadas en el amplificador.

Se ha realizado una simulación de parámetros S mediante una versión de evaluación del simulador de circuitos ADS. Dado que no se dispone de especificación de ganancia, se han simulado únicamente los parámetros S de la segunda etapa antes de añadir el filtro Butterworth de salida, para asegurar la pendiente requerida en especificaciones y de manera que la primera etapa pueda diseñarse con ganancia constante, lo que es más sencillo y permite una mejora en la eficiencia del sistema completo. Los resultados se muestran en la Figura 2.

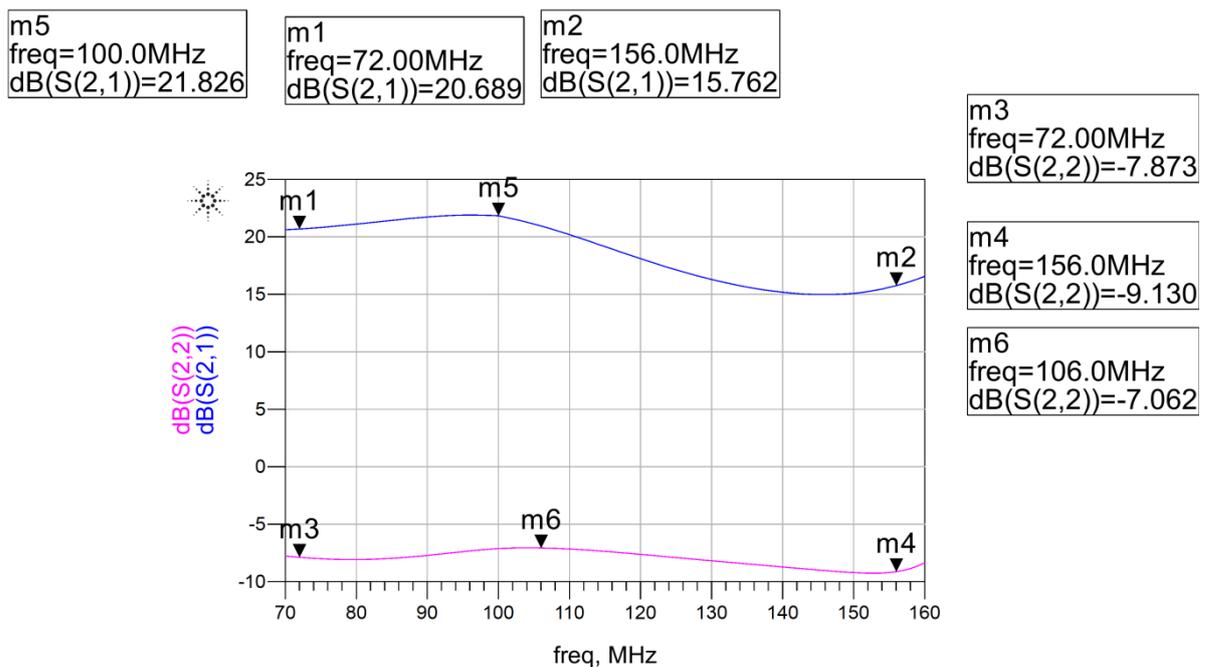


Figura 2. Simulación de parámetros S del amplificador de RF

Como se ve en la figura, la ganancia de la etapa está por encima de 15 dB para la parte alta de la banda, y en torno a los 20dB para la parte baja (la pendiente estimada es de -0.062dB / MHz de 72 MHz a 156 MHz), siendo la adaptación de salida mejor de -7 dB en toda la banda. Teniendo en cuenta que la optimización de este tipo de sistemas a la carga es crítica, y tras cruzar estos resultados de parámetros S con los de balance armónico, el valor de adaptación alcanzado para la segunda etapa de amplificación sin

incluir filtrado se considera el óptimo para este sistema concreto. La adaptación de salida total mejora después de añadir la etapa de filtrado, con valores mejores de 15dB.

Se ha efectuado también una simulación de balance armónico con el fin de comprobar los niveles de estas señales espurias. Para estas simulaciones ya se ha tenido en cuenta el efecto del filtro de salida, que añade pérdidas a la potencia suministrada por el amplificador y modifica ligeramente la impedancia vista desde el mismo.

Los resultados de dichas simulaciones se muestran en las siguientes figuras. La primera se efectúa a la frecuencia de 72 MHz y la segunda en 156 MHz que son los extremos de la banda de frecuencias citadas en las especificaciones del sistema.

Harmonic Balance One-Tone Test

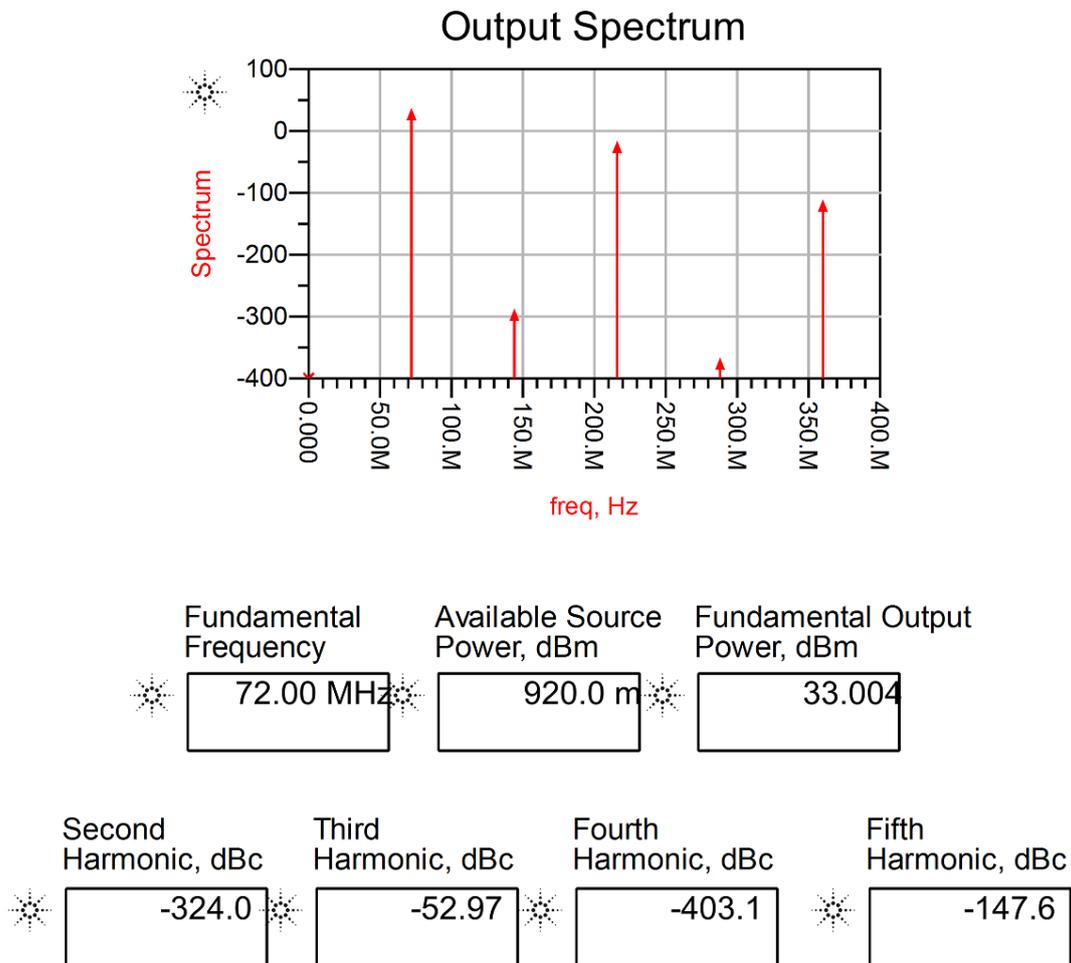


Figura 3. Simulación de balance armónico a 72MHz

Harmonic Balance One-Tone Test

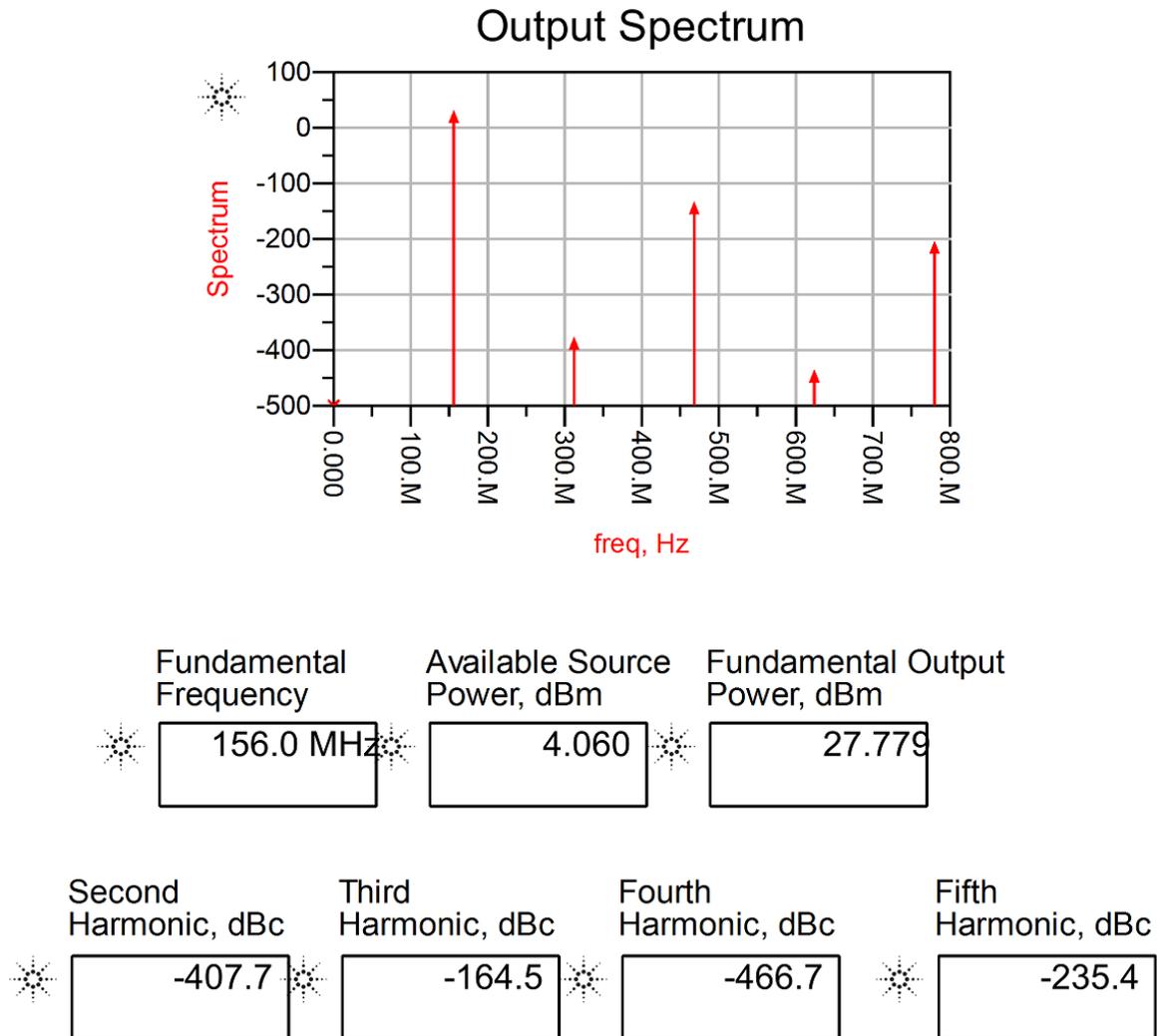


Figura 4. Simulación de balance armónico a 156MHz

Con la máxima potencia necesaria en la salida, se han simulado los valores de corriente consumida por los transistores para las frecuencias de los extremos de la banda. Cada curva de corriente corresponde a una etapa de amplificación, y la suma de ambos, más la primera etapa nos da el consumo de corriente total. La simulación de balance de respuesta armónica de la última etapa del amplificador, da las curvas de consumo de corriente mostradas en la Figura 5 y la Figura 6.

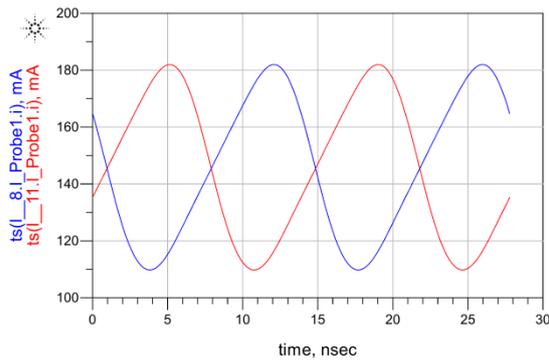


Figura 5. Simulación consumo para la frecuencia de 72 MHz

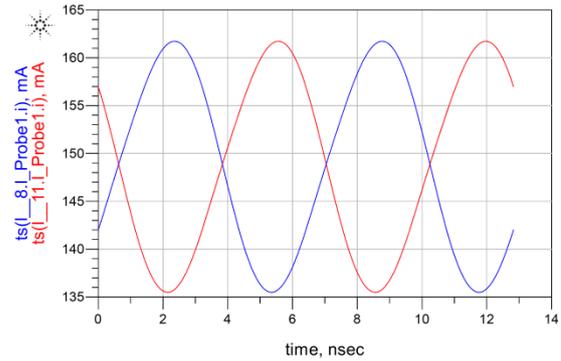


Figura 6. Simulación consumo para la frecuencia de 156 MHz

Con dichos valores de corriente y, añadiendo 60 mA necesarios para una primera etapa del amplificador, se obtienen las siguientes eficiencias:

Para 72 MHz $P_{\text{consumida}} = 4.56 \text{ W} \rightarrow \eta = 100 \times 2 / 4.56 = 43.85 \%$.

Para 156 MHz $P_{\text{consumida}} = 4.32 \text{ W} \rightarrow \eta = 100 \times 0.6 / 4.32 = 13.89 \%$

El bajo valor de eficiencia que muestra el sistema para la parte alta de la banda, se debe a que el consumo del amplificador se corresponde con el que muestra en estado de reposo (sin señal de RF presente a la entrada), es decir, con los valores de consumo de polarización de los transistores recomendados por el fabricante. En este punto, el amplificador está trabajando muy lejos de la zona de máxima potencia, que es en la que se alcanzan los valores de eficiencia más altos.

Todas las simulaciones se han realizado con un suministro de voltaje de entrada de $12V_{\text{DC}}$, pero se debe tener en cuenta que si se disminuye dicha tensión, los niveles de armónicos van a empeorar, del mismo modo que si se aumenta dicha tensión mejorarán los armónicos pero empeorará la eficiencia. Por dichas razones es fundamental mantener la tensión de alimentación del sistema estable en $12V_{\text{DC}}$.

4.1.1 Tecnología del amplificador de radiofrecuencia

El sistema propuesto se basa en tecnología SiMOSFET ampliamente probada.

Con el fin de mejorar la eficiencia, sería necesario pasar a la tecnología de GaN, pero necesitaríamos un cambio de valores de suministro de tensión (28 V).

Dicha tecnología GaN es menos lineal que Si MOSFET, pero se podría trabajar desde el punto de potencia máxima disponible, que podría significar una disminución de nivel de armónicos.

4.2 Fuente de Alimentación

El objetivo básico es la realización de una fuente de alimentación miniaturizada para sistemas de telecomunicaciones, las características básicas son:

PARAMETRO	VALOR	UNIDADES	COMENTARIOS
Tensión de entrada	5	VDC	
Tensión de salida	12	VDC	
Corriente de salida	0.5	A	
Encendido del sistema	Pin al aire		Mediante un pin al aire, puesto a masa el sistema se apaga.

Tabla 2. Especificaciones de la Fuente de Alimentación

Dicha fuente dispondrá de todos los elementos necesarios sobre un PCB portador que puede ser usado independientemente o soldado sobre otro PBC para su uso.

4.2.1 Esquema de bloques de la fuente de alimentación

La fuente a desarrollar tiene el siguiente diagrama de bloques:



Figura 7. Esquema de la fuente de alimentación

Se compone de un filtro pasivo y un regulador conmutado.

4.2.2 Descripción del regulador LT1935

Para implementar este sistema se emplea un regulador integrado de LINEAR TECHNOLOGIES, en concreto el LT1935, cuyas principales características son:

- Frecuencia de conmutación de 1.2 MHz
- Salida de voltaje configurable hasta 38 VDC
- Gran rango de aceptación de voltaje de entrada, de 2.3 VDC a 16 VDC
- Arranque con pendiente suave
- 5 VDC a 1 A para una tensión de entrada de 3.3 VDC
- 600 mA a 12 VDC para una entrada de 5 VDC
- Baja consumo de corriente cuando está inhibido, < 1 uA
- Bajo perfil y huella pequeña SOT-23

Otra razón para escoger dicho regulador es su pequeño tamaño, encapsulado en un SOT-23 y con muy pocos componentes externos, lo que reduce el precio final de la fuente.

El circuito recomendado por el DATASHEET del fabricante es el siguiente:

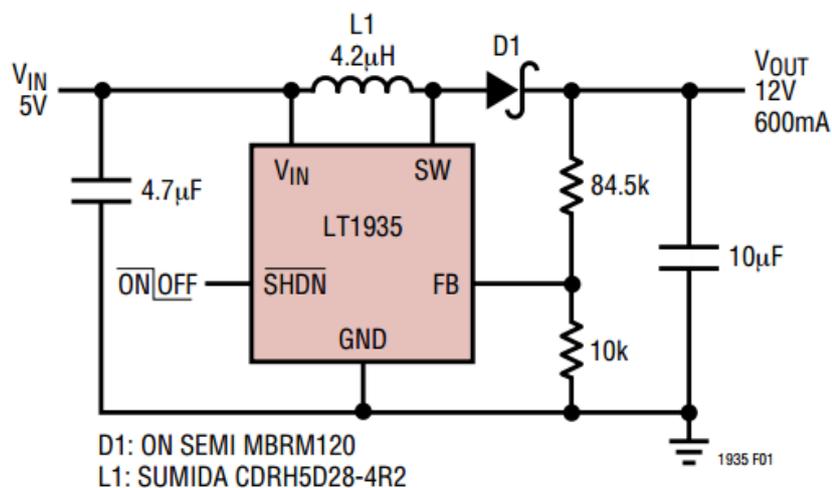


Figura 8. Esquemático básico para la fuente de alimentación

En este circuito básico se pueden identificar:

- El condensador de entrada, que ha de ser de baja ERS para minimizar pérdidas y dado que este tipo de reguladores conmutados requieren fuentes de baja impedancia de entrada para funcionar de manera estable.
- La inductancia, que deberá funcionar a la frecuencia de 1.2MHz a la que conmuta este regulador.
- El diodo, que debe soportar la diferencia de tensión entre entrada y salida para el rango de temperatura de funcionamiento.
- El condensador de salida, que deberá tener baja ESR para minimizar el rizado, y baja ESL para asegurar la estabilidad del sistema.
- El selector de voltaje, formado por el conjunto de resistencias conectadas al pin FB.

Función de los pines:

SW: Pin de conmutación.

GND: Pin de masa.

FB: Pin para realimentación, tiene una referencia de voltaje de 1.265V y sirve para seleccionar el voltaje de salida del convertidor.

SHDN: Pin de habilitación. Para habilitar el convertidor se ha de colocar una tensión de 1.8V o más en dicho pin, además también provee de una función de encendido suave mediante el uso de un filtro RC.

VIN: Pin de entrada de alimentación.

A este esquemático se le han de añadir las protecciones necesarias como el fusible y varactor además de un filtro EMI de entrada.

4.2.3 Operación del regulador LT1935

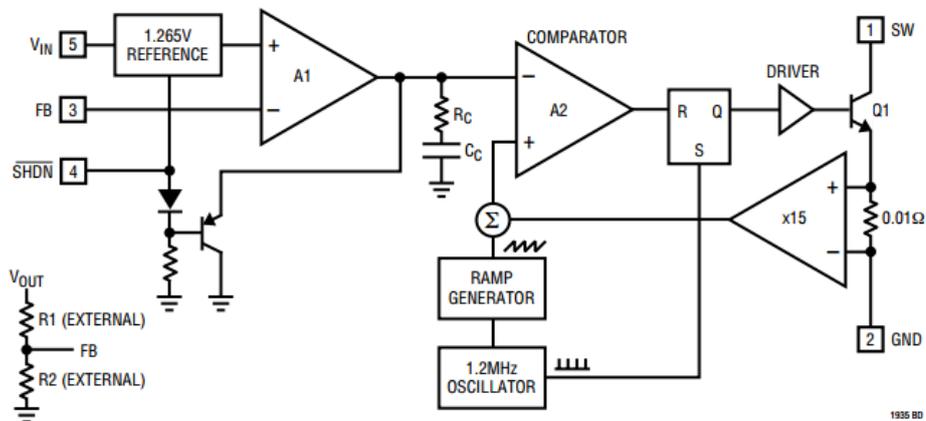


Figura 9. Esquemático interno del LT1935

El LT1935 usa un esquema de frecuencia constante. La operación del sistema se puede observar en la figura 9.

Al inicio de cada ciclo del oscilador, el biestable SR se coloca en estado SET alimentando el transistor Q1. Un voltaje proporcional a la corriente que circula por Q1 se suma con la rampa generada y estabilizada por el oscilador, el resultado es la entrada + del comparador PWM. Cuando el voltaje supera el nivel anterior en la entrada negativa del comparador, el biestable se resetea apagando el transistor Q1.

El nivel en la entrada negativa del comparador es seleccionado por el amplificador de error A1, y esta señal de error es simplemente una amplificación de la diferencia entre el voltaje de realimentación y el voltaje de referencia (1.256V). De esta forma el amplificador de error establece el pico correcto de nivel de corriente para mantener la regulación de salida.

Si la salida del amplificador de error se incrementa, entonces se genera más corriente para la salida.

4.2.4 Selección de componentes para la fuente

Selección de la inductancia:

Junto con este convertidor se deben usar inductancias diseñadas para aplicaciones de conmutación de alta frecuencia, dado que el regulador conmuta a 1.2MHz.

La corriente de saturación de dicha inductancia debe ser superior a 2 A para un ciclo de trabajo mayor al 70%, según recomendaciones del fabricante. Además, dicha corriente RMS debe ser mayor que la corriente media por la inductancia de la aplicación en concreto en que la vamos a usar (0.38A en nuestro caso). Para una mejor eficiencia la resistencia en corriente continua de la inductancia debe ser menor de 100mΩ.

El valor de la inductancia está directamente relacionado con el rizado en corriente. Como aproximación, fijando un valor de rizado de 1/3 de la corriente máxima de conmutación y suponiendo un valor de corriente máxima de 2 A, tenemos:

$$L = 3 \times (V_{IN}/V_{OUT}) \times (V_{OUT}-V_{IN}) / (I_{max} \times F)$$

$$\text{Para } V_{out} = 12V \text{ e } V_{IN} = 5V$$

$$L = 3 \times (5/12) \times (12-5)/2 \times 1.2M = 3.9\mu H$$

Selección del diodo:

Se ha de usar un diodo SCHOTTKY con una corriente mínima de 1A o mayor. El voltaje inverso del diodo debe ser al menos 20V, lo que dada la aplicación para la que se utilizará la fuente es suficiente, pero puede ser de 30V o 40V para otras aplicaciones.

Selección del condensador:

Se han de usar condensadores con baja ESR (resistencia serie) para minimizar pérdidas y calentamiento de componentes. Para la mayoría de las aplicaciones se pueden usar condensadores cerámicos con dieléctricos del tipo X5R o X7R, prestando especial atención para que la variación de la capacidad con la temperatura y tensión de

funcionamiento no altere las propiedades del circuito y siga funcionando en una zona estable de la fuente.

Para la entrada se recomienda un condensador de 4.7 μF . El condensador de salida proporciona corriente a la salida durante los cambios de carga y estabiliza el lazo de control del convertidor. Generalmente cuanto mayor es la carga de salida (en términos de corriente) mayor debe ser la capacidad de dicho condensador. Un condensador de 20 μF es muy recomendable para esta aplicación.

Selección de la tensión de salida:

La tensión de salida del convertidor se define con las resistencias R1 y R2 según la fórmula:

$$V_{\text{out}} = 1.265 \times (1 + R1/R2)$$

Para el caso de 12 V de salida con R2=10 K Ω :

$$R1 = ((V_{\text{out}}/1.265)-1) \times R2 = ((12/1.265)-1) \times 10\text{K} = 84.86 \text{ K}\Omega$$

Como esta resistencia no pertenece a ninguna serie se pueden usar dos resistencias en serie de 51 K Ω y de 34 K Ω que conjuntamente son equivalente a una sola de 85 K Ω , con este valor la tensión de salida es de:

$$V_{\text{out}} = 1.265 \times (1 + 84.4\text{K}/10\text{K}) = 12.0175 \text{ V}$$

Arranque del sistema:

Uno de los problemas de las fuentes conmutadas es el transitorio de corriente de entrada cuando se inicia el sistema. Algunos convertidores disponen de un sistema de arranque suave de manera que el consumo de corriente inicial es sostenido durante el tiempo.

Para realizar este tipo de arranque se debe añadir una red RC en la entrada SHDN de modo que se genere una rampa de arranque en dicho PIN:

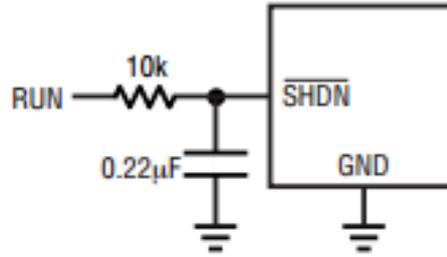


Figura 10. Sistema de arranque suave

Además, con el fin de mejorar el transitorio que se produce con cambios de carga de salida (al pasar, por ejemplo de no tener señal de entrada en el amplificador a tenerla), es necesario añadir un condensador entre la salida y el pin de realimentación. Dicho condensador introduce una diferencia de fase entre los cambios de salida y de referencia, con lo que los picos de tensión en el transitorio ante cambios de carga se atenúan.

4.2.5 Simulaciones para el regulador LT1935

Las simulaciones han sido realizadas con LTSPICE, un software libre que proporciona la casa Linear Technologies.

Teniendo en cuenta las consideraciones del apartado anterior se procede a realizar las simulaciones.

En un primer lugar colocaremos componentes ideales con el esquemático simplificado, sin los componentes de arranque suave, eliminación de transitorios ni filtro de entrada. La carga se corresponde con la que verá la fuente de alimentación una vez conectada al amplificador de RF que alimenta. El circuito simulado es el siguiente:

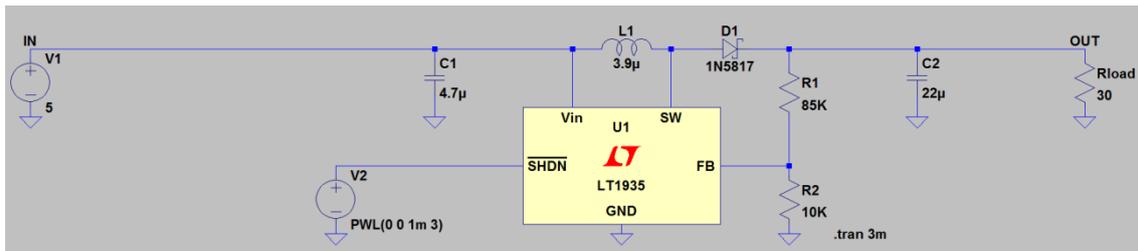


Figura 11. Esquema de simulación de fuente alimentación simplificado.

Con este esquemático simulamos para ver los componentes principales: tensión de salida, corriente en la carga, corriente de entrada, tiempo de establecimiento y transitorio.



Figura 12. Simulación temporal de V_{OUT} , I_{IN} , I_{OUT}

De la figura anterior se desprende que la tensión de salida es de 11.96VDC y que el tiempo de arranque del sistema es de en torno a 600µs. Puede verse además que el rizado en la corriente de entrada es bastante alto, en torno a los 700mA. Esto justifica la necesidad de incorporar un filtro en pi de entrada que minimice dicho rizado.

Si se obtiene la transformada de Fourier de la señal de corriente de entrada (como muestra la Figura 13), es posible ver que las componentes fundamentales de la misma se encuentran a $N \times 1.2\text{MHz}$, que es la frecuencia de conmutación del regulador.

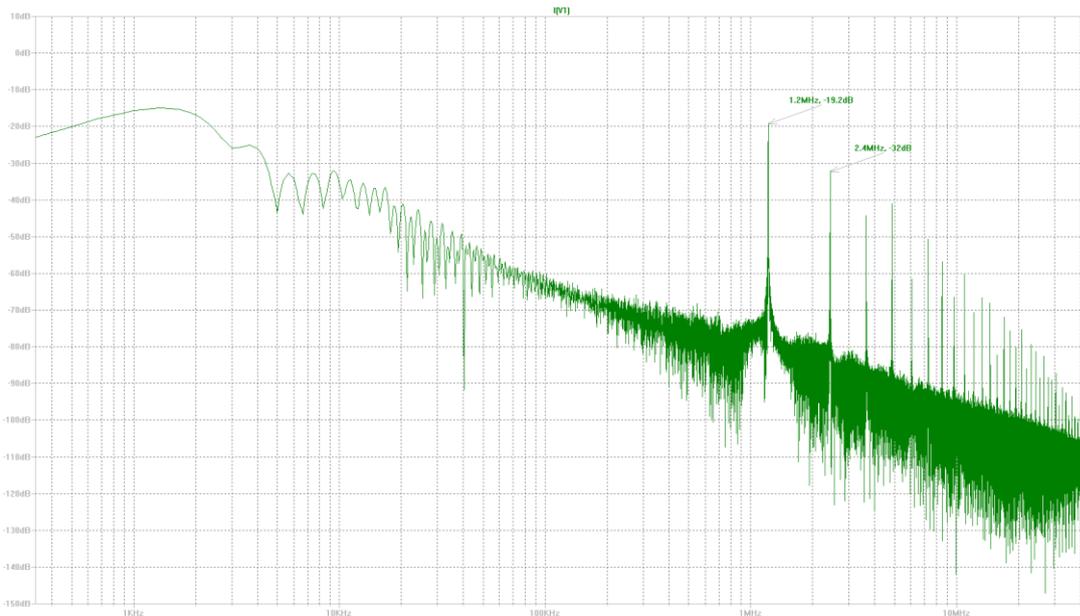


Figura 13. TTF de la corriente de entrada

Con objeto de reducir el citado rizado de corriente de entrada, se incorporará un filtro en pi sencillo formado por una inductancia y dos condensadores. Los valores de dichos componentes se escogen de manera que la carga vista desde la entrada de alimentación sea inductiva para que los transformadores que la alimentan (no son objeto del presente estudio) no vean alterado su comportamiento.

Es posible ver, así mismo, que el pico transitorio de la tensión de salida alcanza valores en torno a los 12.1V, valor que si bien no es crítico sí es claramente mejorable y, dado que no se tiene una limitación en el tiempo de arranque del sistema, se atenuará con el sistema de encendido suave.

Una vez incorporados todos los elementos necesarios al sistema, el circuito correspondiente para la fuente de alimentación completo queda como se muestra en la siguiente figura.

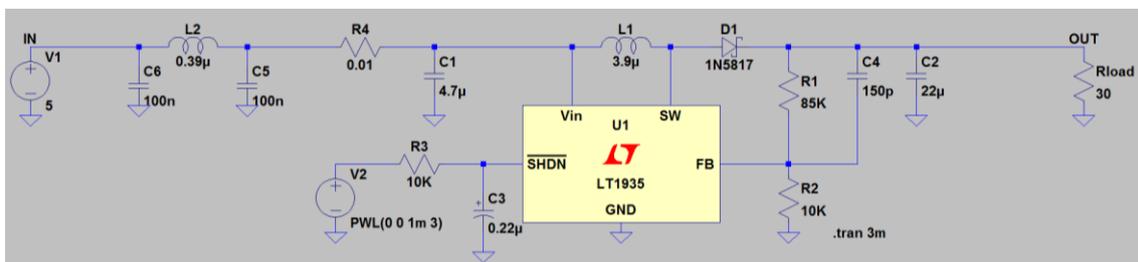


Figura 14. Esquema de simulación completo

Con este esquemático, se simula para ver de nuevo los resultados principales de la fuente de alimentación, con la misma carga que proporciona la corriente que consumirá el amplificador de RF una vez conectado.

En la siguiente figura pueden verse los resultados de tensión de salida, corriente de salida y corriente de entrada en la fuente de alimentación.

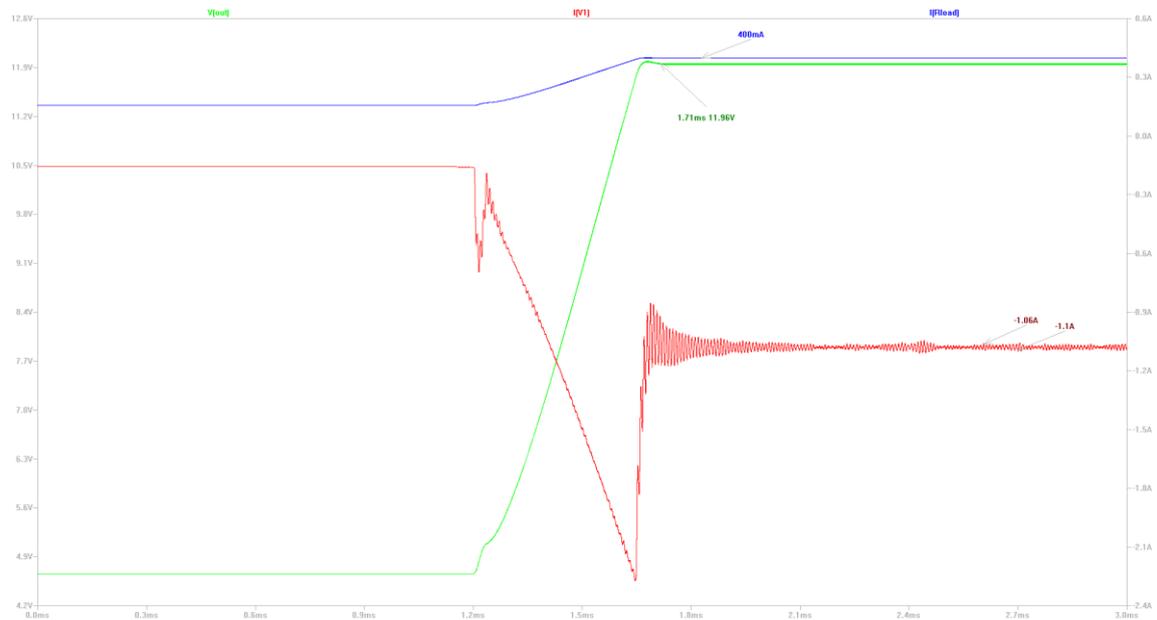


Figura 15. Simulación temporal de V_{OUT} , I_{IN} , I_{OUT} definitiva

De la gráfica se deduce que el valor de la tensión de salida (11.96V) no ha cambiado, lo mismo que se mantiene estable el valor de la corriente de salida (400mA). En cambio, el tiempo de establecimiento de la señal y el pico transitorio en la tensión de salida si han cambiado. Este efecto se aprecia mejor en el detalle de la figura a continuación, en el que puede verse que el sobre impulso de tensión de salida pasa de 0.14V a apenas 0.02V. A cambio, el tiempo de establecimiento de la tensión de salida pasa de los 0.6ms a 1.7ms, que para la aplicación que se hace de la fuente es un valor bastante bajo.

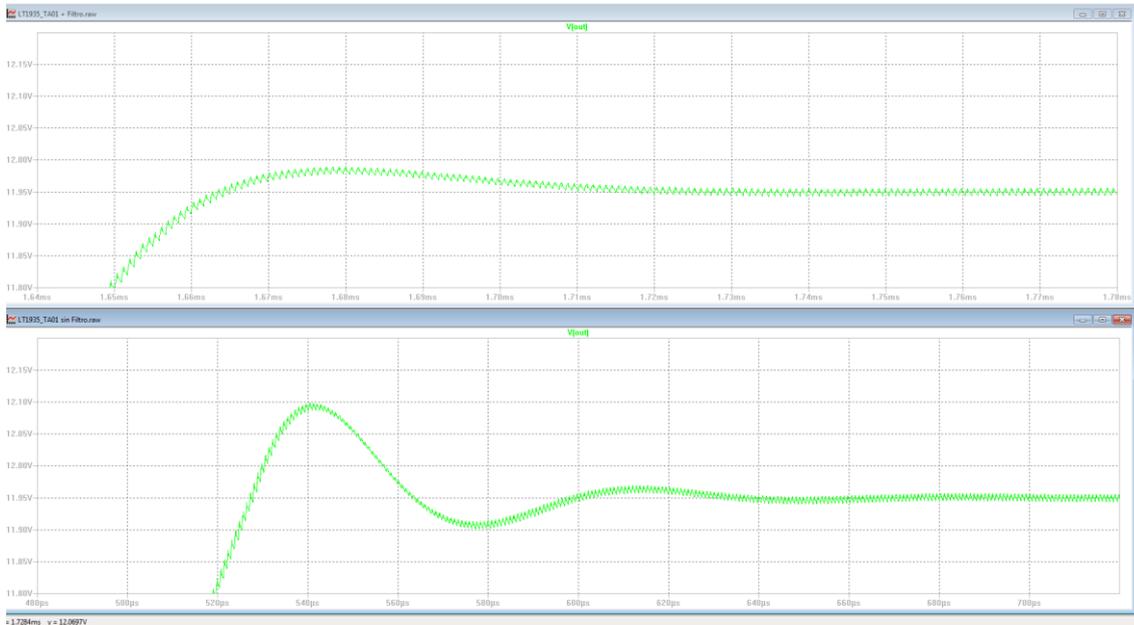


Figura 16. Comparativa de V_{OUT} con y sin circuito de arranque suave

Otro punto interesante que puede afectar a los sistemas a los que alimenta es el rizado de tensión de salida. En la siguiente grafica se muestra este rizado:

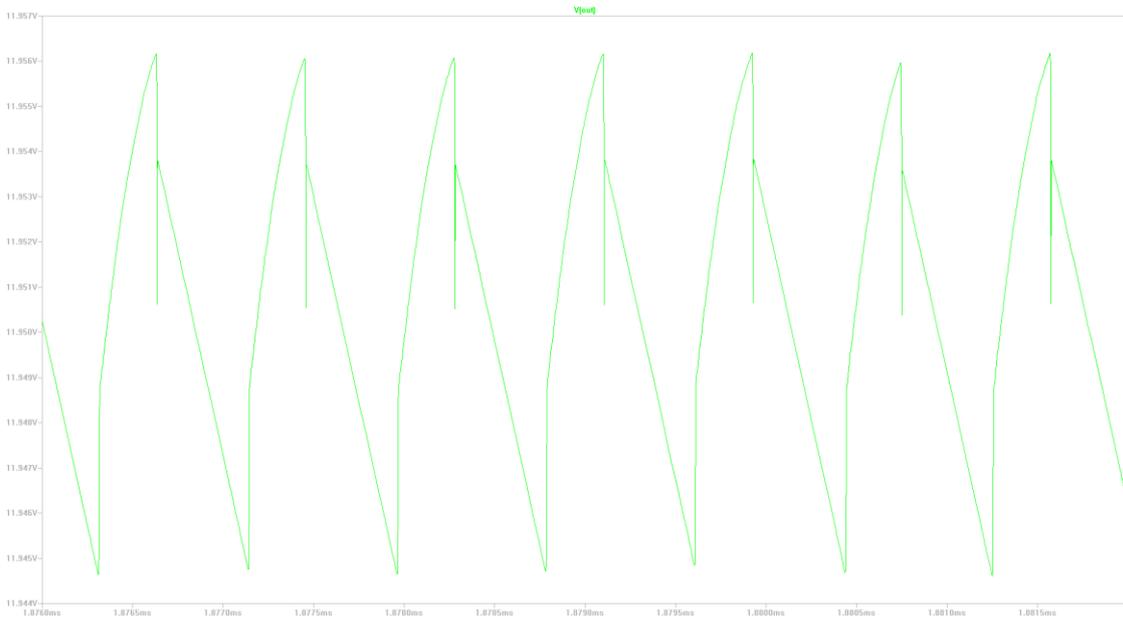


Figura 17. Simulación de rizado en tensión de salida

El rizado de salida es de unos 0.012V, suficientemente pequeño para la mayoría de equipos electrónicos incluido nuestro amplificador de radiofrecuencia.

El rizado de corriente de entrada se ha reducido considerablemente, tal como puede verse en la figura 15. Dicho rizado ha pasado a ser de unos 40mA, en lugar de los 700mA antes de la incorporación del filtro de entrada. En la figura a continuación puede verse la transformada de Fourier de la corriente de entrada tras la incorporación del filtro, donde las componentes en $N \times 1.2\text{MHz}$ se han atenuado más de 40dB.

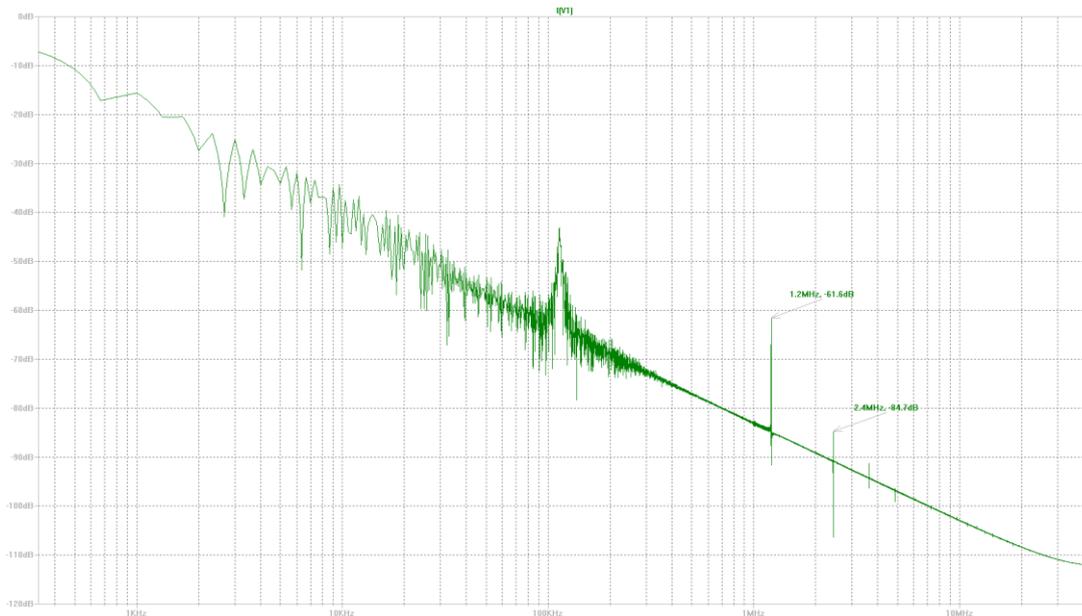


Figura 18. TTF de la corriente de entrada definitiva

Aparece un empeoramiento de la respuesta de la corriente de entrada en unos 120kHz, debido a que es la frecuencia de corte del filtro en pi introducido en el sistema (una década por debajo de las componentes que queremos filtrar). Sin embargo, estas componentes son lo bastante bajas (menor de -40dB) como para resultar despreciables, dado que los condensadores de salida de la fuente de 5V que alimentará el sistema se encargarán de atenuarlas en gran medida.

El rizado en la corriente de salida es menor de 0.4mA, tal como se muestra en la siguiente figura. Este valor es bastante bueno y hay que tener en cuenta que se verá reducido por los componentes de filtrado que incorpora el amplificador.

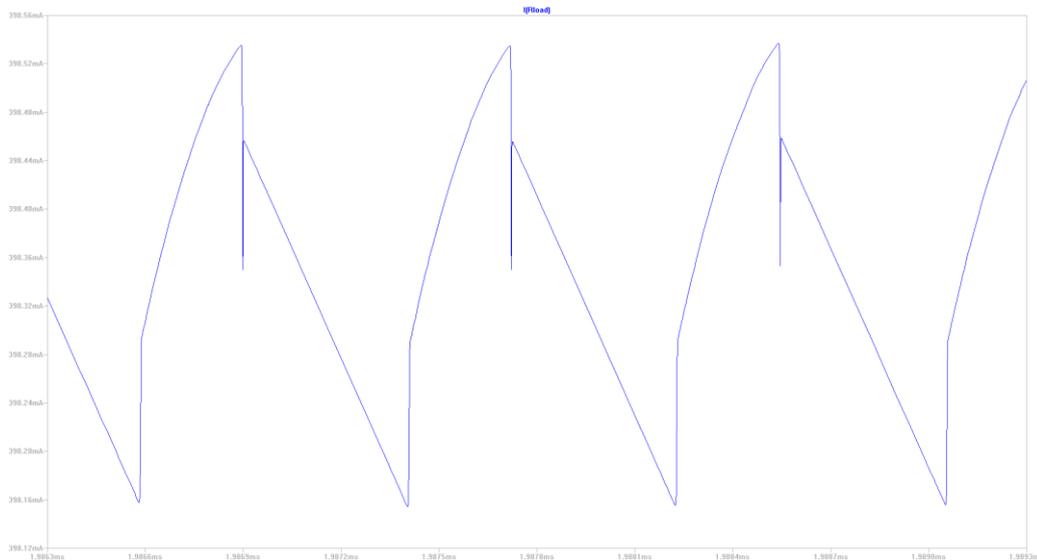


Figura 19. *Rizado de corriente de salida*

Con todos los parámetros de la fuente de alimentación comprobados, se da por bueno el diseño de la misma y no es necesario incorporar más elementos a la misma que los ya nombrados.

Con los datos simulados de corrientes, la eficiencia de la fuente de alimentación es:

$$\eta(\%) = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} * 100 = \frac{V_{OUT} * I_{OUT}}{V_{IN} * I_{IN}} * 100 = \frac{11,96 * 0,4}{5 * 1,05} * 100 = 91,12\%$$

Con este valor, para tener en el amplificador una salida de 2W necesitaremos un consumo de potencia de la fuente de entrada de $4.56W @ 12V / 0.9112 = 5W$.

Luego la eficiencia completa del sistema con 2W de salida será de:

$$\eta = \frac{P_{RF}}{P_{DC}} * 100 = \frac{2W}{5W} * 100 = 40\%$$

5. ESQUEMÁTICO

Tanto el esquemático como el LAYOUT del presente proyecto se han generado usando la herramienta EAGLE en su versión libre.

EAGLE ofrece software de diseño de PCB de calidad con las características que hacen el trabajo más sencillo.

Para realizar el LAYOUT se usará una placa de FR4 con un espesor de 0.8 mm, para este espesor el ancho de línea de 50Ω será de 0.85 mm usando coplanar con una distancia a masa de 0.25mm

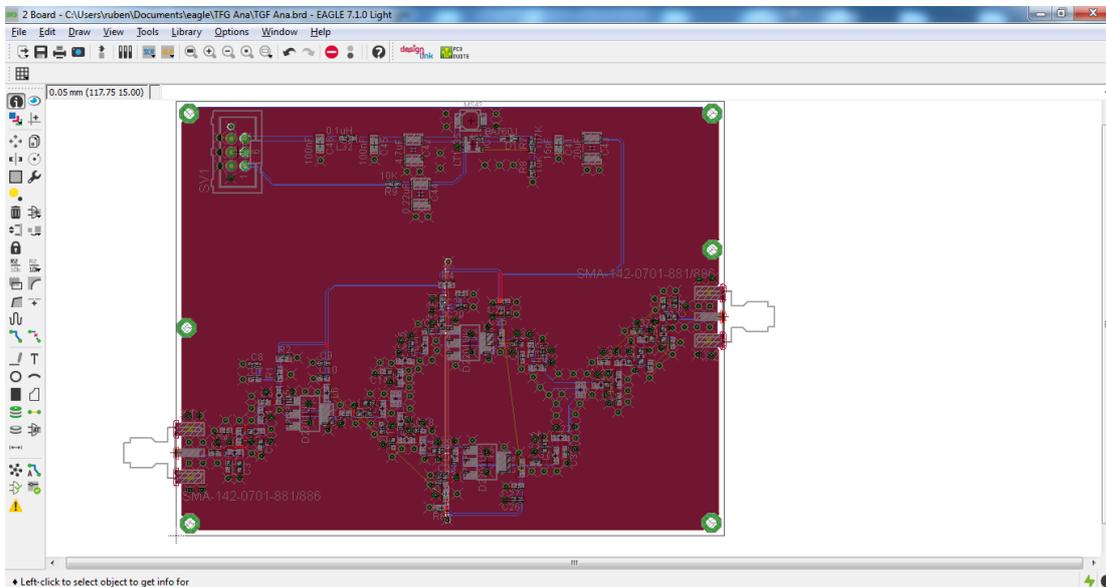


Figura 20. Pantalla de LAYOUT EAGLE

Conductor Impedance

Conductor Width (W)
0,85 mm

Conductor Height (H)
0,8 mm

Conductor Gap (G)
0,25 mm

W/H = 1.062

Z_0
53.8732 Ohms

Options

Base Copper Weight

- 9um
- 18um
- 35um
- 53um
- 70um
- 88um
- 106um
- 142um
- 178um

Plating Thickness

- Bare PCB
- 18um
- 35um
- 53um
- 70um
- 88um
- 106um

Passive Circuits

- Microstrip
- Microstrip Embed
- Stripline
- Stripline Asym
- Dual Stripline
- Coplanar Wave

Units

Imperial
 Metric

Substrate Options

Material Selection
FR-4 STD

Er **4,6** Tg (°C) **130**

Temp Rise (°C)
20
Temp in (°F) = 36.0

Ambient Temp (°C)
22
Temp in (°F) = 71.6

Information

Total Copper Thickness **53 um** VIA Thermal Resistance **179.268 Deg C/Watt**

Print **Solve!**

Figura 21. Impedancia de línea

La siguiente imagen muestra el esquemático del sistema completo:

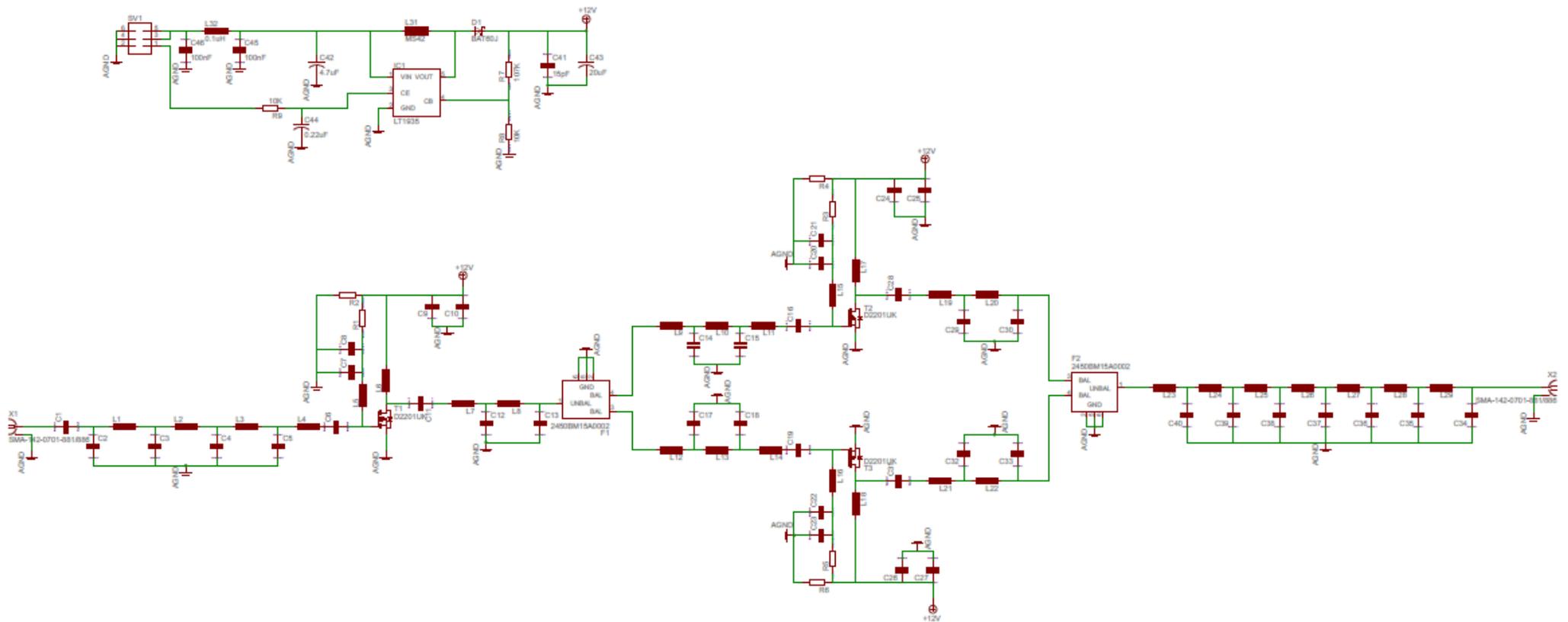


Figura 22. Esquemático del sistema completo

6. LAYOUT

El layout del circuito completo correspondiente al esquemático anterior se muestra en las siguientes imágenes.

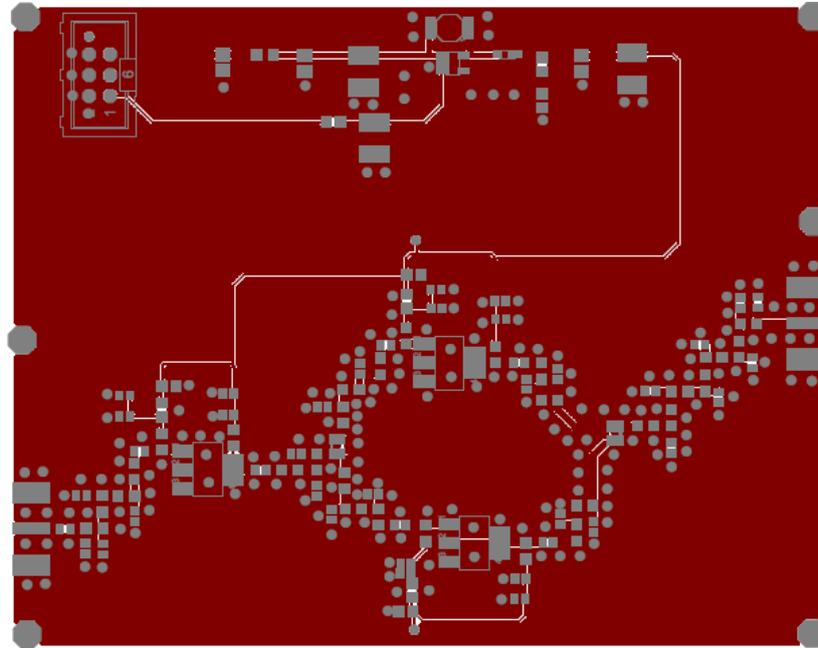


Figura 23. Top Layout

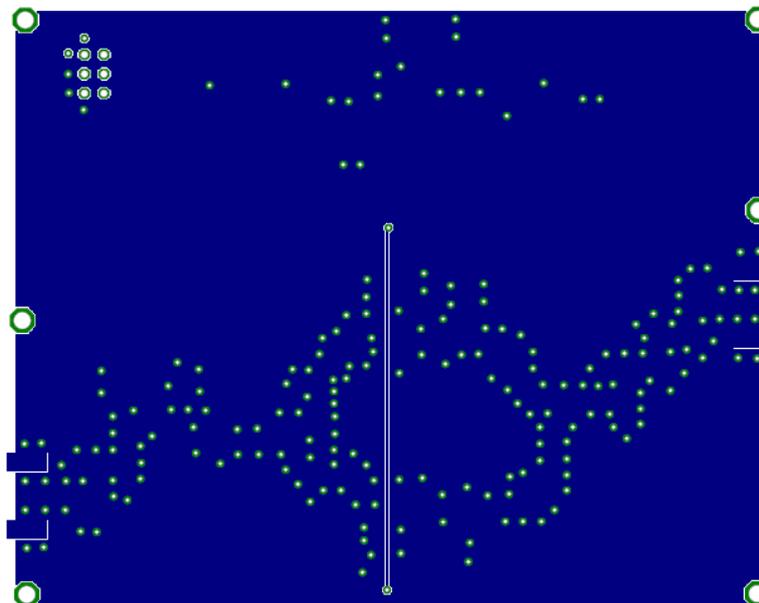


Figura 24. Bottom Layout

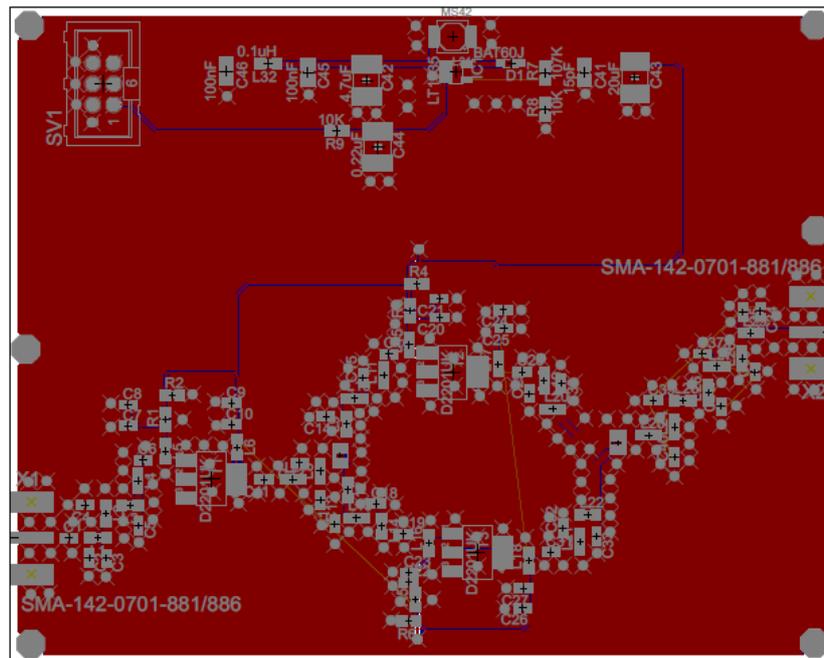


Figura 25. Layout completo

El PCB será exportado en formato GERBER para ser enviado a la empresa de fabricación.

El tipo de archivo estándar para la fabricación de PCB, es el GERBER. Este puede exportarse en diferentes formatos, sin embargo 274X, 274D y ODB++, son los más habituales.

En la actualidad todos los programas de diseño tienen como opción exportar en formato GERBER 274x, dicho formato se caracteriza por tener las aperturas incluidas en cada archivo, reduciendo así la oportunidad de error humano y los tiempos en la carga de datos.

En el sistema GERBER se necesita un archivo por cada capa. Ha de tenerse en cuenta una capa extra con el contorno exacto del circuito y mecanizados internos si los tuviera.

El formato estándar para los taladrados es el EXCELLON, en el caso de existir taladros no metalizados, es aconsejable incluirlos en un segundo archivo de taladrado.

7. SISTEMA MECÁNICO

El sistema mecánico consta de una caja de aluminio con una tapa, dicha caja está totalmente cerrada de manera que la radiación hacia el exterior es muy baja.

Las siguientes imágenes muestran el sistema mecánico:

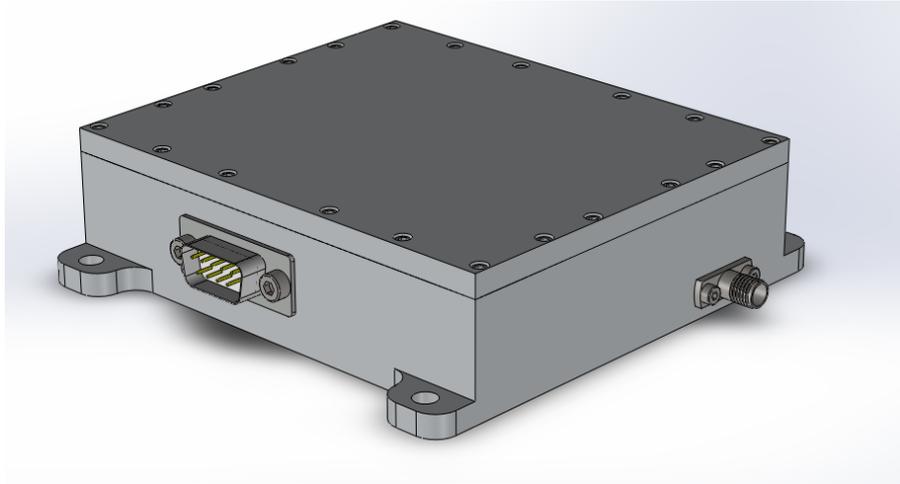


Figura 26. Sistema mecánico completo

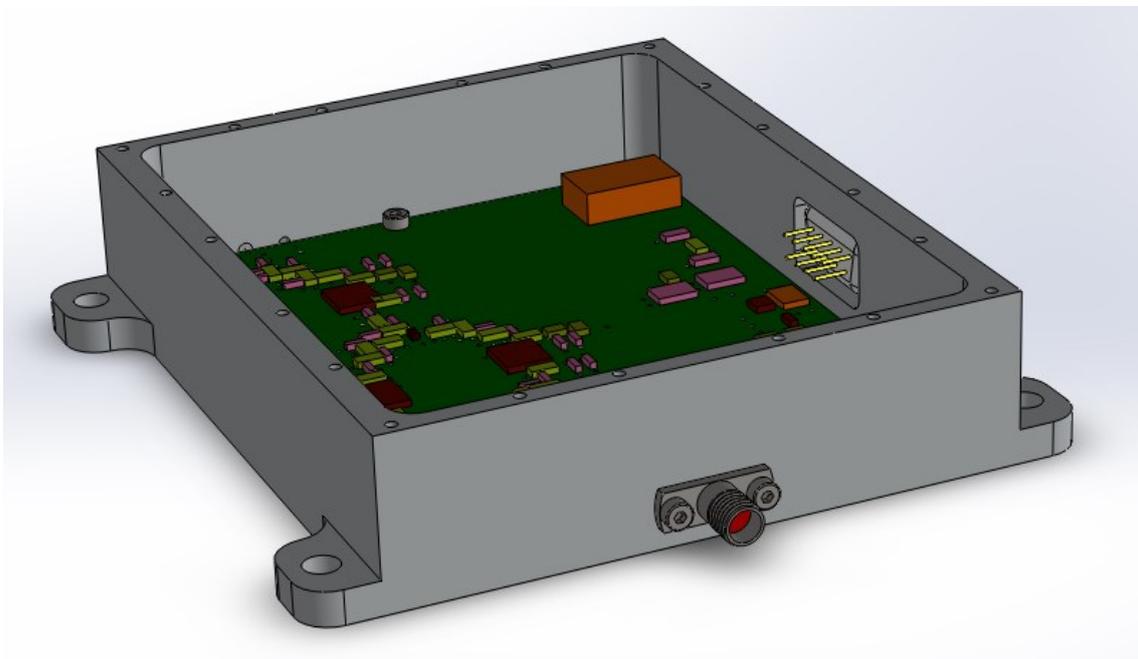


Figura 27. Sistema mecánico abierto

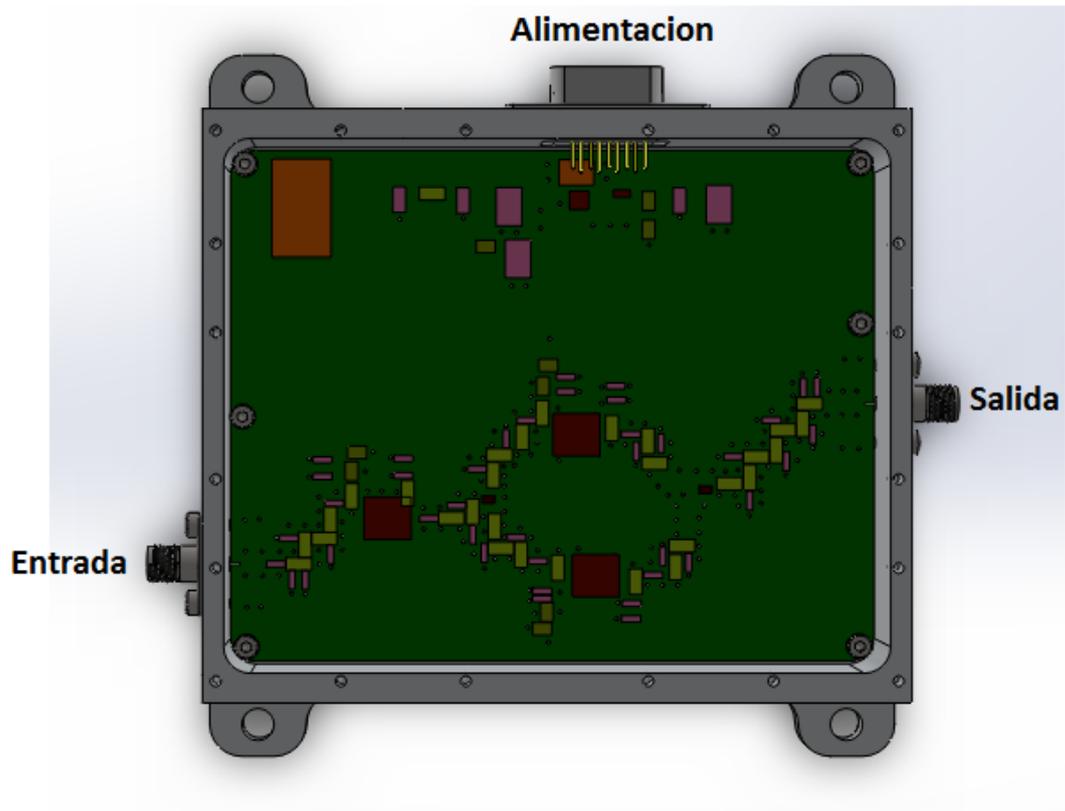


Figura 28. Vista superior del sistema mecánico con PCB

Como se ve en la imagen anterior el sistema consta de una entrada y una salida con conectores SMA (hembra) y un conector DB9 estándar que se usa como entrada de alimentación y control.

Los planos de fabricación simplificados del sistema mecánico donde se integran el amplificador de RF y la fuente de alimentación son los que se muestran en la figura 29.

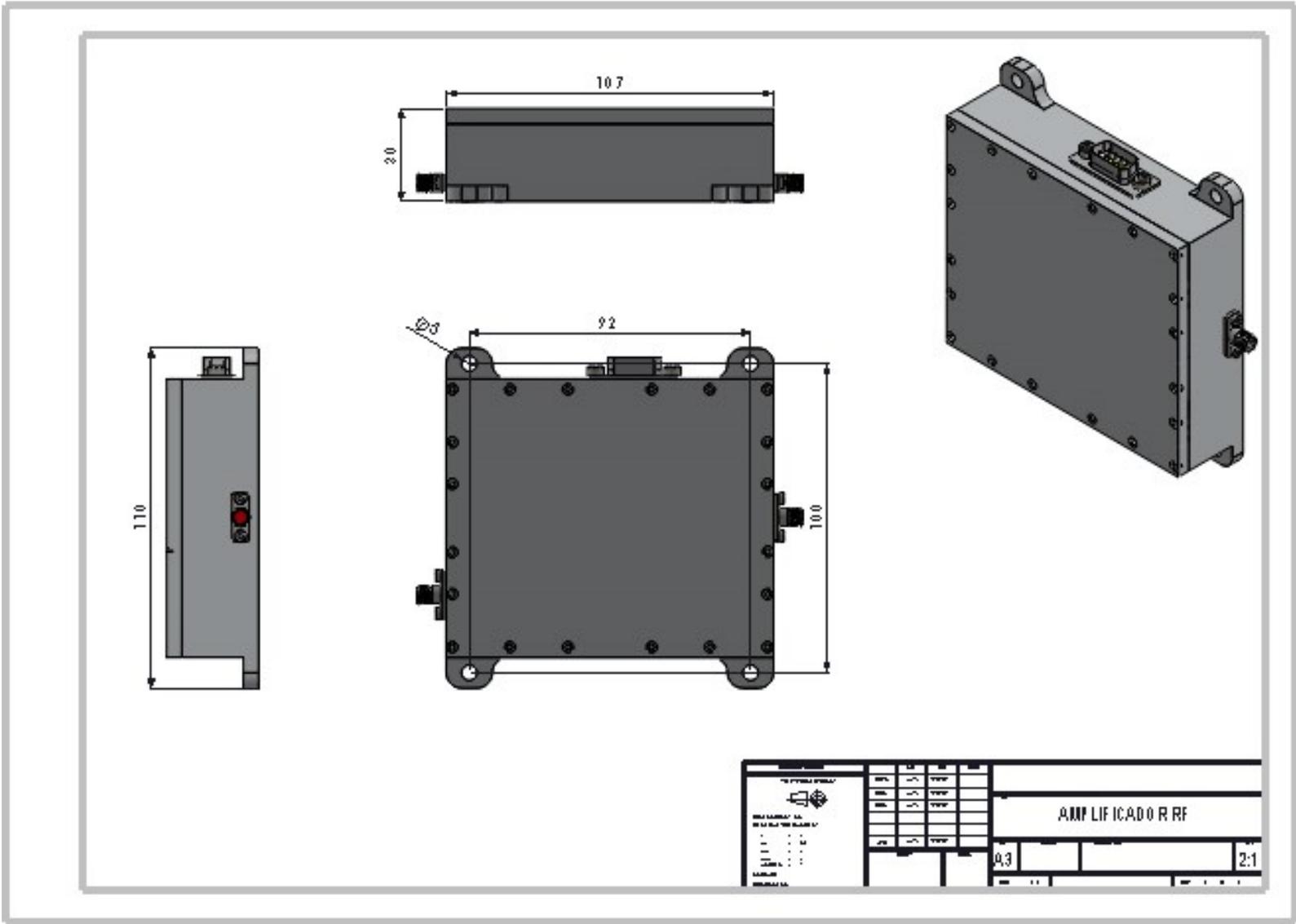


Figura 29. Planos del sistema mecánico

8. PRESUPUESTO

En este apartado se desglosan los componentes del sistema así como los gastos, estos se dividen en dos partes, por una parte los recurrentes y por otra los no recurrentes:

8.1 Gastos recurrentes

Se entienden como gastos recurrentes aquellos que derivan de la producción en serie de las unidades. Estos cálculos de gastos se realizarán para una producción en serie de 50 unidades, para diferentes cantidades el coste de los componentes puede variar.

CONCEPTO	CANTIDAD	COSTE
Amplificadores RF D2201UK	3	51 €
Regulador DC/DC LT1935	1	2,35 €
Condensadores X7R	2	1,24 €
Diodo BAT60J	1	0,26 €
Inductancia 3,9uH	1	0,46 €
Resistencias varias 0603	8	0,04 €
Condensadores varios 0603	40	1,2 €
Conectores SMA R125462001	2	27,45 €
Conector DB-9	1	0,3 €
Caja + tapa aluminio	1	100 €
Mano de obra de montaje + acondicionamiento	1.5	67,5 €
Mano de obra de validación	0.5	30 €
TOTAL		281,8 €

Tabla 3. Gastos recurrentes

Como vemos de la tabla anterior cada unidad en producción para 50 unidades cuesta 281,8 €. En estos gastos no se aplican los beneficios ni la gestión del proyecto de producción ni amortizaciones para equipos.

8.2 Gastos no recurrentes

Como gastos no recurrentes se clasifican los necesarios para realizar tanto el diseño de todos los elementos como la validación y certificación de una unidad. Todo esto lo podemos desglosar en:

CONCEPTO	COSTE
Coste de componentes de 5 unidades prototipo	1409 €
6 horas diseño mecánico (60 €/hora)	360 €
30 horas diseño eléctrico (60 €/hora)	1800 €
40 horas de verificación de prototipos (60 €/hora)	2400 €
TOTAL	5969 €

Tabla 4. Gastos no recurrentes

Dichos gastos contienen todo lo necesario para colocar dicho producto en el mercado.

8.3 Precio de venta del amplificador

Para calcular el precio de venta total del amplificador completo, se debería llevar a cabo en primer lugar un estudio de mercado. Como no es este el objeto del proyecto, supondremos que el periodo de amortización del diseño será de 5 años, con unas ventas de 40 unidades al año y un beneficio por unidad del 30%.

Como el diseño del presente amplificador es fácilmente extrapolable a otras frecuencias cercanas y potencias de salida necesarias, supondremos así mismo que el 50% de los costes no recurrentes se podrán amortizar en otros productos similares (PCBs, diseño mecánico, diseño eléctrico de la fuente de alimentación, etc). Por ello, sólo repercutiremos en la serie el 50% de los gastos no recurrentes.

Con todo lo anterior tenemos:

Número de amplificadores en producción:

$$N = 5 \text{ años} * 40 \frac{\text{unidades}}{\text{año}} = 200 \text{ unidades}$$

Gastos de fabricación recurrentes:

$$GR = 200 \text{ unidades} * 281,8 \frac{\text{€}}{\text{ud}} = 56360\text{€}$$

Gastos no recurrentes:

$$GNR = 0,5 * 5969 = 2984,5\text{€}$$

Gastos totales:

$$G = GR + GNR = 59344,5\text{€}$$

Gastos por unidad:

$$GU = \frac{G}{N} = \frac{59344,5}{200} = 296,7225\text{€}$$

Margen de beneficio: $MB = 30\%$

Precio por unidad:

$$PVP = GU * \left(1 + \frac{MB}{100}\right) = 296,7225 * 1,3 = 385,74\text{€}$$

9. CONCLUSIONES

Como conclusiones se derivan:

- Es necesario colocar un filtro de entrada cuando se usan DC/DC del tipo empleado en este documento a fin de “limpiar” la señal de alimentación de entrada.
- Para realizar un sistema de este tipo es necesario el uso de herramientas software de diferentes ámbitos como son la simulación, la ingeniería mecánica o la creación de PCB.
- El coste de producción del sistema es relativamente bajo y puede ser introducido en diversas áreas del mercado.

Uno de los posibles usos es como driver para sistemas AOTF en el espectro visible, aunque con el diseño del presente documento es muy sencillo obtener variaciones del amplificador que permitan añadir otras banda de frecuencia y ligeras variaciones en la potencia del sistema. Con ellas los usos del amplificador podrían estar en sistemas de comunicación por radio, sistemas de alimentación de AOTFs en el espectro infrarrojo, ultravioleta y cercano al IR, sistemas de telemando, etc.