



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH**

**Escola Superior d'Enginyeries Industrial,
Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa**

PROYECTO FINAL DE GRADO

**Design of the Electric Power System of a Cubesat
Educational kit**

**Diseño del sistema de potencia eléctrica de un
CubeSat (Kit educacional)**

AUTOR: DANIEL VALVERDE CAJA

TUTOR UNIVERSITARIO: DAVID DIEZ GONZALEZ

GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y AUTOMÁTICA



AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, a los profesores que me han ayudado en el proyecto. A Manel Lamich por su todo su tiempo dedicado a resolver los problemas que nos daba el microcontrolador y su configuración, a Javier por todas esas tardes en el laboratorio, a David por darme la oportunidad de participar en el proyecto, a cada uno de ellos, por poner parte de su pensamiento, tiempo y dedicación a mi proyecto, sin ellos no hubiera sido posible el proyecto.

A la universidad por darme la posibilidad de utilizar todas las herramientas necesarias así como los laboratorios para poder hacer el trabajo.

A mi compañero Jordi Sans, que día tras día ha estado trabajando conmigo codo con codo para poder finalizar ambos con éxito nuestros trabajos de final de grado.

A toda mi familia que me han ayudado, por su comprensión constante en todas las etapas desde que llegué a la universidad y que finalmente, colman con este proyecto.

A todos, y a los que seguramente me deje, gracias por todo, sin vosotros no hubiera sido posible nada de este proyecto.

DANIEL VALVERDE CAJA

Diseño de un sistema de potencia eléctrica de un CubeSat (Kit educacional)



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Escola Superior d'Enginyeries Industrial,
Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa





RESUMEN

Este proyecto nace a raíz de un antiguo proyecto de un antiguo alumno de ERASMUS que hubo en la universidad (Antoine), quién hizo el diseño de un CubeSat a modo “Kit educacional” para la universidad.

Un CubeSat es por definición un estándar en el diseño de nano satélites, de 10 centímetros por arista y una masa inferior a 1,33kg.

En este proyecto, la característica de la masa puede no cumplirla ya que, se hará un kit educacional, de manera que otros estudiantes puedan aprovecharlo para el aprendizaje y estudio.

El proyecto se basa en el diseño de la placa de potencia del CubeSat diseñado por Antoine. A la vez, un compañero (Jordi Sans) hará el diseño del algoritmo MPPT para la carga de las baterías del CubeSat.

El CubeSat estará alimentado por placas solares (en el espacio, la única fuente de energía que se puede aprovechar es el del Sol), y la placa de potencia tendrá que optimizar al máximo esa energía para poder ejecutar las funciones pertinentes (grabar imágenes, enviar información a la Tierra...).

Se diseñarán y crearán dos PCB con convertidores de diferentes materiales (GaN (Nitruro de Galio) y SiC (Carburo de Silicio), para ver los comportamientos de las dos placas, compararlas, sacar conclusiones y decidir qué placa es más adecuada para el CubeSat.



ABSTRACT

This project appeared from another project from an ERASMUS student (Antoine). That project was about an “CubeSat Educational kit”. By its definition, a CubeSat is an standard design of nanosatelits with 10cm of edge and a máximum weight of 1,33kg.

This project, the second condition wont be fulfilled, as it will be an educational kit so that other students can take benefit or learn more about this topic.

This project is based on the study and design of the EPS (Energy power system) and at the same time, my partner Jordi Sans will desing the MPPT algorithm for charging the CubeSat batteries.

The CubeSat will be powered by solar panels (in space the only source of energy is light from the sun) and the EPS will optimize this energy to extract the maximum efficiency of it in order to execute the relevant functions (record images, send information to Earth...)

Two PCB's with two different materials GaN (Gallium Nitride) and SiC (Silicon Carbide) will be designed and created to see, compare and draw conclusions between them and to decide which is more suitable for the CubeSat.



ÍNDICE

RESUMEN	1
LISTA DE FIGURAS	1
LISTA DE ILUSTRACIONES	2
LISTA DE TABLAS	2
1. INTRODUCCIÓN	3
1.1 ANTECEDENTES Y OBJETIVOS	7
1.1.1 ANTECEDENTES	7
1.1.2 OBJETIVOS	8
2. ESTADO DEL ARTE	9
2.1. ESTRUCTURA DEL SISTEMA DE POTENCIA ELÉCTRICA	9
2.2 ESTRUCTURA DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA	11
3. SISTEMA DE POTENCIA ELÉCTRICA	13
3.1 PANELES SOLARES	13
3.2 CONVERTIDOR	16
3.2.1 TRANSISTOR DE GAN (NITRURO DE GALIO)	19
3.2.2 TRANSISTOR SIC (CARBURO DE SILICIO)	20
3.2.3 COMPARATIVA GAN, SIC, SI	21
3.2.4 CONCLUSIONES	23
3.3 BATERÍA	24
4. ESPECIFICACIONES DEL DISEÑO DEL CONVERTIDOR	26
4.1 COMPLICACIONES DEL DISEÑO	27
5. SIMULACIÓN	29
5.2 DISEÑO SIMULADO	30
5.3 RESULTADOS ESPERADOS	34
5.4 RESULTADO DE LAS SIMULACIONES	35
5.3.1 SIMULACIÓN GAN	35



5.3.2 SIMULACIÓN SI.....	37
5.5 CONCLUSIÓN DE RESULTADOS	39
6. PLANIFICACIÓN Y PRESUPUESTOS	42
6.1 DIAGRAMA DE GANTT	42
6.2 BOM (BILL OF MATERIALS).....	43
7. DISEÑO DEFINITIVO.....	45
9. BIBLIOGRAFIA.....	48



LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estructura general de un CubeSat.....	4
Figura 2. Distintas agrupaciones de CubeSat posibles.....	5
Figura 3. Tipo de CubeSats lanzados por año.....	6
Figura 4. Arquitectura TED.....	9
Figura 5. Arquitectura PPT.....	10
Figura 6. Estructura Centralizada.....	11
Figura 7. Estructura Distribuida.....	12
Figura 8. Paneles solares de IXOLAR modelo SLMD121H0L.....	13
Figura 9. Gráfica de radiación de dos caras opuestas.....	15
Figura 10. Esquema eléctrico de un convertidor Buck.....	17
Figura 11. Esquema eléctrico de un convertidor Boost.....	17
Figura 12. Esquema eléctrico de un convertidor Buck-Boost.....	17
Figura 13. Extrusión 3D de la batería.....	24
Figura 14. Diagrama MPPT P&O.....	25
Figura 15. Esquema de un circuito LISN.....	29
Figura 16. Esquema de simulación de GaN.....	30
Figura 17. Esquema de simulación de Si.....	30
Figura 18. Valores de V1 para GaN.....	31
Figura 19. Valores de V2 para GaN.....	31
Figura 20. Valores de V1 para Si.....	32
Figura 21. Valores de V2 para Si.....	32
Figura 22. Gráfica tensión de V1 y V2.....	32
Figura 23. Gráfica del valor de salida del convertidor.....	33
Figura 24. Gráfica FFT de V(e) en GaN.....	35
Figura 25. Etapas de la gráfica FFT.....	36
Figura 26. Gráfica FFT de V(e) acotada.....	37
Figura 27. Gráfica FFT del valor de tensión de V(e) con el MOSFET de Si.....	38
Figura 28. Gráfica FFT de V(e) de Si acotada.....	38
Figura 29. Comparación de las gráficas FFT acotadas a 30MHz.....	41
Figura 30. Diagrama de Gantt.....	42
Figura 31. Esquemático de GaN.....	45
Figura 32. Layout de la PCB de GaN.....	45
Figura 33. Esquemático de Si.....	46
Figura 34. Layout de la PCB de Si.....	46



LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. CubeSat creado por impresión 3D	7
Ilustración 2. Distribución de los paneles solares en el CubeSat	15
Ilustración 3. Comparativa de tamaño entre semiconductores de Si y GaN	20
Ilustración 4. Pack de pilas. Batería	24

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características de los paneles solares	14
Tabla 2. Comparativa de los diferentes materiales	21
Tabla 3. Valores armónicos FFT en GaN.....	36
Tabla 4. Valores armónicos FFT en Si.....	38
Tabla 5. Límites establecidos por CISPR de clase A y B	39
Tabla 6. Actividades y fechas del proyecto	41
Tabla 7. BOM (Lista de componentes).....	42



1. INTRODUCCIÓN

Este proyecto trata sobre el diseño y estudio del sistema de potencia eléctrica de un CubeSat, pero antes de ello, se hará un breve resumen de lo que es un CubeSat.

Un CubeSat por definición es un estándar en el diseño de nano satélites, de diez centímetros de arista y una masa inferior a 1,33kg.

La diferencia de estos satélites sobre los convencionales son, principalmente:

- Su bajo coste y tiempo de fabricación
- Su accesibilidad al espacio para distintas instituciones.

Los primeros diseños de un CubeSat, fueron sobre el año 1999 de mano de los profesores Robert Twiggs y Jordi Puig-Suari (CalPoly , Californian Polytechnic State University), para que sus estudiantes pudieran diseñar, construir un satélite, ya que las posibilidades de poder enviar objetos al espacio y poder hacer estudios eran muy reducidas, así como muy costosos, cosa que hacía que pocas instituciones pudieran hacerlo [1].

Ante la aparición del CubeSat, empezó una nueva era del espacio.

Éste nuevo dispositivo, daba la posibilidad de poder enviar un satélite al espacio, en una órbita baja del planeta (LEO, por sus siglas en inglés Low Earth Orbit), de forma que se pudieran sacar datos, información y hacer estudios del espacio de una forma fácil, barata y rápida que hasta ese momento nunca se podría haber planteado.

A raíz de esta aparición, han sido muchas las instituciones capaces de poder crear su propio CubeSat para investigación, estudio...



No fue hasta el 2003 que se puso en órbita el primer CubeSat, en la plataforma rusa de lanzamiento de Plesetsk por los servicios de lanzamiento Eurokot. Ese CubeSat costó sobre los \$60.000, cuando en ese momento, un satélite podía costa millones de dólares [16] [17].

Hoy en día, ese precio se ha reducido mucho, hasta el punto de poder crear un CubeSat funcional, para enviar a órbita, a partir de \$25.000.

Este proyecto, tiene como objetivo crear un kit educacional, por lo tanto puede que no satisfaga la especificación del peso, pero lo que sí cumplirá serán las especificaciones de tamaño.

Ahora que ya se ha explicado a grandes rasgos qué es un CubeSat, se entrará más en profundidad sobre el dispositivo.

Un CubeSat, generalmente, se puede dividir diversos en “bloques” o “pisos” cómo se puede ver en la siguiente imagen

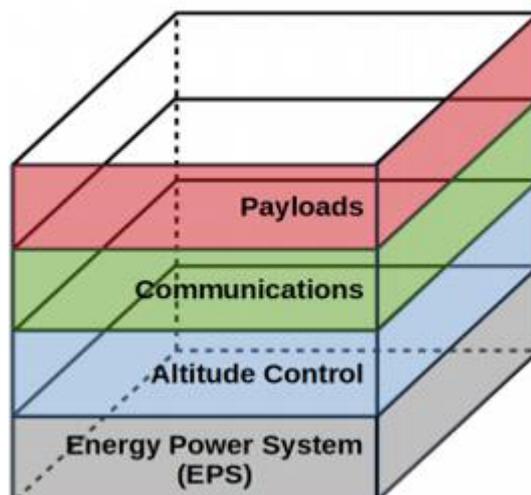


Figura 1. Estructura general de un CubeSat



Pues, cada uno de estos bloques tiene una función específica en el funcionamiento del CubeSat:

Payload: O carga útil del dispositivo, podría ser una cámara, sensores...

Bloque de comunicaciones: El CubeSat deberá estar en constante comunicación con la Tierra para enviar y recibir información y órdenes. Ésta parte de la estructura se encargará de ello.

Control de altitud: Una de las partes más importantes del CubeSat. En ella, mediante algoritmos y sensores se hará el control del CubeSat, teniendo en cuenta que en su hábitat natural hay una ingravidez total.

Sistema de potencia eléctrica (EPS): La parte en la que se basará el proyecto. De manera que el CubeSat funcione, reciba, capte y envíe información, éste, necesita energía. Esta parte de la estructura se encargará de subministrar, transferir y usar la energía.

Ésta última parte será la que se desarrollará en este proyecto, haciendo un estudio de su funcionamiento y aplicación.

Estas son los diferentes partes que se pueden diferenciar dentro de un CubeSat, pero a la vez, éstos se pueden agrupar entre ellos para crear grupos mayores, cómo se pueden ver en la siguiente imagen:



Figura 2. Distintas agrupaciones de CubeSat posibles.



Figura 2. Distintas agrupaciones de CubeSat posibles.

Agrupando varios CubeSats, el dispositivo podrá tener más capacidad para albergar más payloads para poder almacenar y captar más información, por ejemplo.

Ahora que ya es conocido todas las diferentes variantes que puede tener un CubeSat, en la siguiente gráfica se dará a conocer desde 1998 hasta los próximos años, qué tipos de CubeSat serán puestos en órbita.

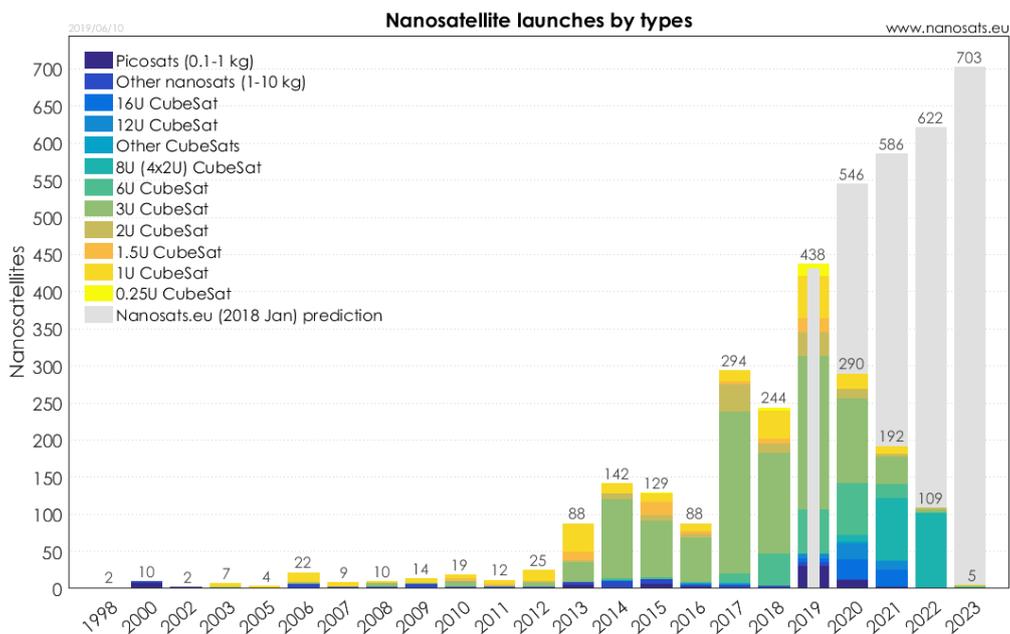


Figura 3. Tipo de CubeSats lanzados por año [15].



1.1 ANTECEDENTES Y OBJETIVOS

1.1.1 ANTECEDENTES

Un antiguo proyecto sobre un CubeSat de un alumno de ERASMUS fue el camino a seguir para este proyecto.

Dicho proyecto se basaba en la explicación y descripción de un CubeSat.

Aquel estudio no hacía énfasis en las distintas partes de un CubeSat y, ante la posibilidad de poder finalizar y complementar aquel trabajo se pensó y se creó el proyecto actual.

De todos los bloques que conforman un CubeSat se quiso hacer un estudio sobre uno de ellos, placa de potencia.

Las diferentes problemáticas que se encontraron (energía solar para abastecer al CubeSat, su mismo tamaño...) ayudaron a pensar y hacer la proposición de un estudio comparativo sobre qué tipo de sistema de potencia eléctrica era el más adecuado para el CubeSat.

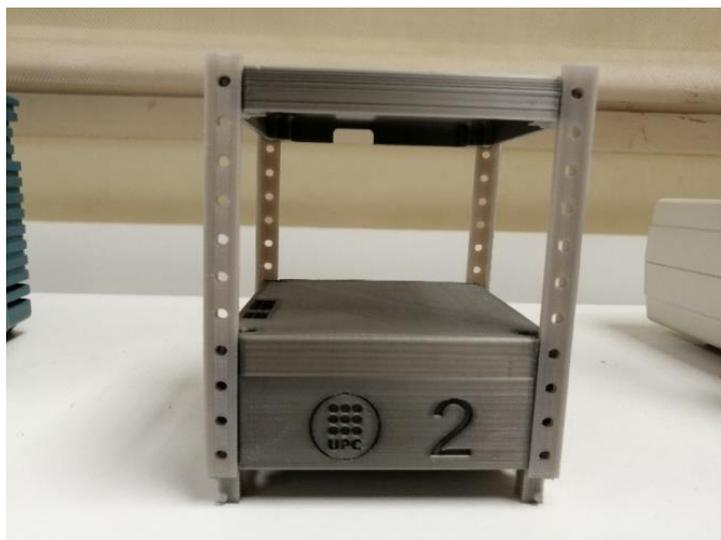


Ilustración 1. CubeSat creado por impresión 3D.



1.1.2 OBJETIVOS

El objetivo fundamental de este proyecto es poder adquirir una base tanto teórica como práctica sobre los CubeSats, estudiar cómo sería su comportamiento y hacer un estudio sobre qué sistema de potencia sería el más adecuado según las especificaciones y problemáticas.

Este proyecto estará enfocado a la EPS (Electrical Power System o Sistema de potencia eléctrica), en base a cómo transformar la energía captada mediante los paneles solares para el correcto funcionamiento del CubeSat, qué driver sería el más adecuado para sus funciones, y, cómo agrupar todo esto en una PCB con el tamaño y espacio y características del CubeSat.

Por lo tanto, podemos discernir entre los siguientes objetivos para el proyecto:

- 1- Conocer de primera mano las funciones de un CubeSat, sus especificaciones, pros y contras.
- 2- Mediante el software de "Arduino", configurar y crear un algoritmo PWM mediante un microprocesador STMF103C8T6 (conocido como "Bluepill").
- 3- Encontrar y comparar diferentes soluciones al problema, crear y diseñar dos placas de PCB con dos drivers diferentes para observar sus comportamientos y decidir cuál es el más adecuado.



2. ESTADO DEL ARTE

2.1. ESTRUCTURA DEL SISTEMA DE POTENCIA ELÉCTRICA

Toda la energía que necesitará el CubeSat será la proporcionada por la luz solar.

Ésta luz solar será proyectada en las placas solares y deberá ser almacenada en las baterías del CubeSat.

En el sistema de potencia de un CubeSat se pueden encontrar diferentes estructuras o arquitecturas, dependiendo de varios factores. Los principales son, la estructura TDE (Transmisión directa de energía o también llamada DET

por sus siglas en inglés), y la estructura PPT (Peak Power Tracking, por sus siglas en inglés), que ahora se describirán [2].

TED (Transmisión directa de energía): Ésta arquitectura tiene la siguiente forma:

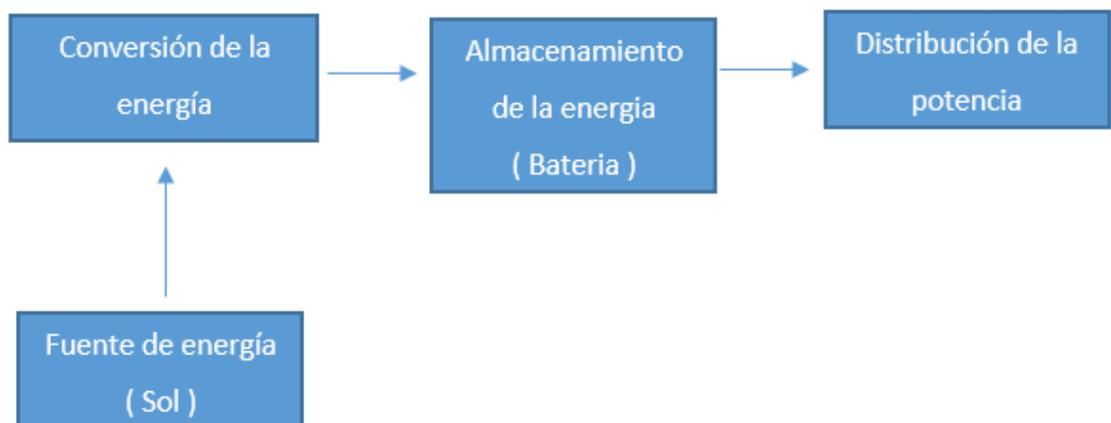


Figura 4. Arquitectura TED



Cómo se puede ver y, cómo se puede deducir de su nombre, este tipo de estructura permite la transmisión directa de energía, reduciendo así las pérdidas de potencia ya que tiene menos componentes que las otras estructuras.

Un gran inconveniente pero, es que, todos los componentes y todas las fases que se pueden diferenciar (Paneles solares, baterías,...) tienen que trabajar con el mismo voltaje, ya que no hay ninguna conversión ni elemento entre componentes.

La otra arquitectura es la PPT, con la siguiente estructura:

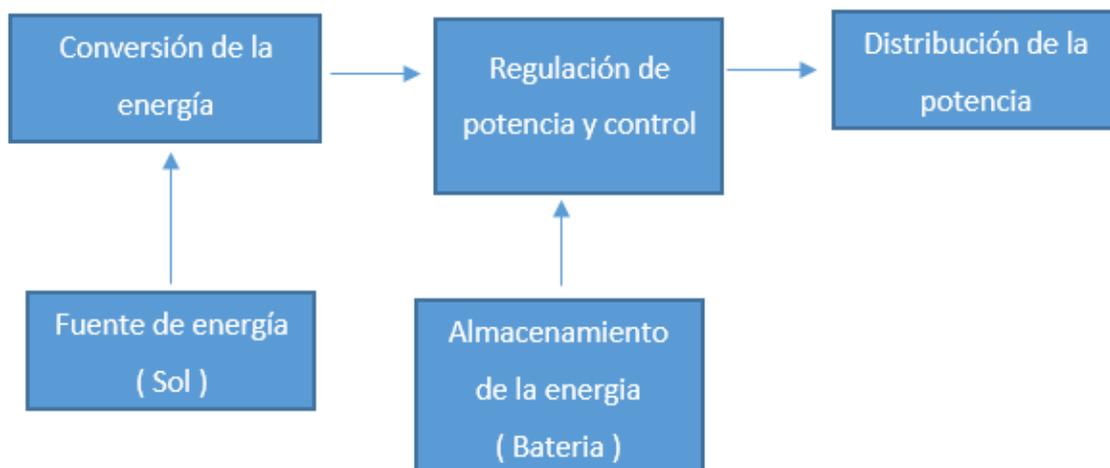


Figura 5. Arquitectura PPT

La principal diferencia que se puede ver sobre la primera estructura TDE es el bloque de “Regulación de potencia y control”.

En éste bloque se implementa, entre otras cosas, el MPPT (Maximum power peak tracking) que es un tipo de controlador de carga que permite obtener la máxima potencia de los paneles solares haciéndolos trabajar siempre en el punto de máxima potencia entre el balance de voltaje e intensidad de forma que se pueda sacar la máxima eficiencia al sistema.



Pues, al contrario que la otra estructura, ésta no necesita que cada componente funcione con el mismo voltaje, ya que hay una etapa más que funciona como regulador.

2.2 ESTRUCTURA DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA.

Además de las estructuras del sistema de potencia eléctrica, también se necesita una estructura de distribución de la energía.

Se pueden definir dos estructuras, la centralizada y la distribuida [3].

La arquitectura centralizada tiene el siguiente esquema:

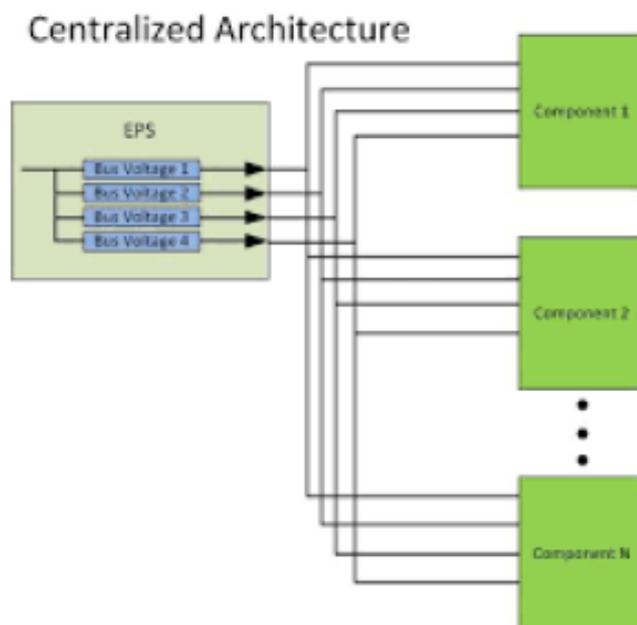


Figura 6. Arquitectura Centralizada

Esta estructura distribuye todos (o la gran mayoría) los buses de voltaje usados por el CubeSat desde una localización central.



La principal ventaja es, que menos reguladores serán necesarios, ya que, con uno puede proporcionar el mismo voltaje regulado para los diferentes subsistemas o componentes, por otra banda, el regulador tiene que ser lo suficientemente grande para que todas las cargas puedan conectarse.

La estructura distribuida, que tiene el siguiente esquema:

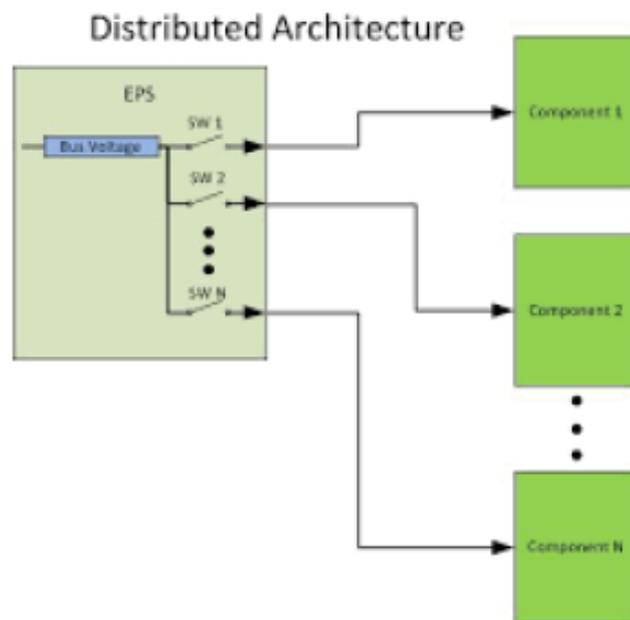


Figura 7. Arquitectura Distribuida

A diferencia de la arquitectura centralizada, distribuye un único bus de voltaje a los diferentes subsistemas o componentes.

Cada uno de estos subsistemas o componentes tienen su propio bus dedicado, por eso, con esta estructura cada componente o subsistema puede ser encendido o apagado individualmente sin afectar a los otros.



3. SISTEMA DE POTENCIA ELÉCTRICA

Un sistema eléctrico de potencia se compone de tres partes: Generación (o producción) de la energía, la transmisión de energía y la distribución de dicha energía al consumidor o usuario.

En el caso del CubeSat, la generación/producción o en este caso específico la captación de energía se encarga los diversos paneles solares distribuidos por todo el satélite.

La segunda parte, transmisión y, en este caso en particular, regulación de la energía, será el convertidor.

Para finalizar, la última etapa, la distribución de energía, cómo el consumidor final será el propio convertidor, se tiene que almacenar, por lo tanto, las baterías serán la última etapa.

3.1 PANELES SOLARES

Los paneles solares que se utilizaran en el CubeSat para captar la energía proveniente del sol serán de la marca IXOLAR el modelo SLMD121H10L, de Silicio mono cristalino que ofrece una mayor eficiencia que uno policristalino.



Figura 8. Paneles solares de IXOLAR modelo SLMD121H0L



Las características de cada uno de estos paneles solares son las siguientes [5]:

Dimensiones	45 x 32 x 2 mm
Peso	4.5 gr
Eficiencia	Hasta 22%
Voltaje en MPP	5,01 V
Intensidad en MPP	44,6 mA
Potencia en MPP	223 mW

Tabla 1. Características de los paneles solares

Por lo tanto, por cada cara del CubeSat habrá cuatro paneles:

- Una intensidad en MPP , $I_{Mpp} = 4 \times 44,6 \text{ mA} = 178,4 \text{ mA}$
- Un voltaje en MPP de 5,01 V (están en paralelo).
- Una potencia en MPP , $P_{Mpp} = 4 \times 223 \text{ mW} = 892 \text{ mW}$

El CubeSat, cómo bien indica su nombre, tiene forma de cubo, eso significa que está formado por seis caras, de las cuáles cuatro, tendrán paneles solares.

Las otras dos serán, una, para la payload (cámara, sensores...) y la otra para poder manipular o, usar cómo soporte.

Por las dimensiones de cada panel solar, cada cara podrá contener cuatro conectados en paralelo, cuya distribución quedará cómo en la imagen siguiente.



Ilustración 2. Distribución de los paneles solares en el CubeSat.

Por lo tanto, serán un total de veinte paneles solares en todo el CubeSat.

Las caras del CubeSat estarán conectadas dos a dos en paralelo con su cara opuesta.

En la siguiente gráfica se puede ver la razón:

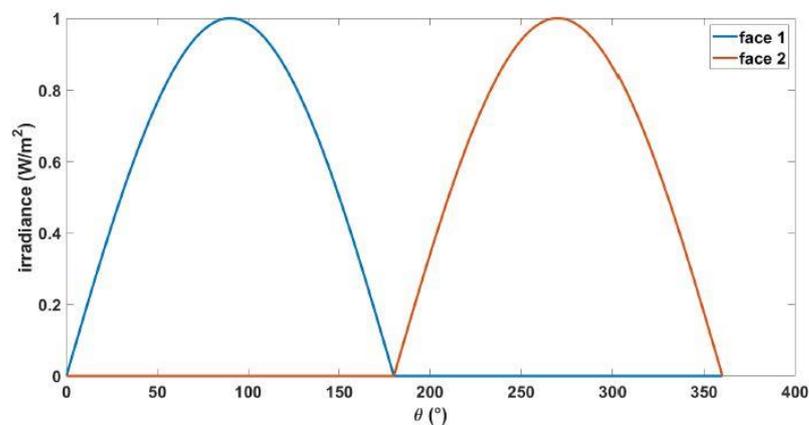


Figura 9. Gráfica de radiación de dos caras opuestas.



Se pueden distinguir dos señales, una, en azul que sería la cara 1 del CubeSat y, en rojo, la cara 2 del CubeSat, dónde 1 y 2 son caras opuestas.

En un mismo instante, el sol, únicamente iluminará una de las dos caras mientras la otra estará en completa oscuridad, cómo puede observarse a los 90° o a los 270° .

Este hecho hace que, se puedan optimizar componentes, ya que sólo se necesitarán dos controladores (uno por cada par de caras opuestas) en vez de uno individual por cada cara.

3.2 CONVERTIDOR

El convertidor es una pieza fundamental del sistema de potencia del CubeSat y la parte principal del proyecto.

Los paneles solares del CubeSat estarán conectados con la batería, pero será necesaria una regulación de potencia, función que hará el convertidor.

En éste caso, el convertidor será la parte encargada de transformar, corriente continua de una tensión a otra, es decir, un convertidor DC-DC.

Dentro de los convertidores podemos encontrar tres tipos diferentes: Buck, Boost y Buck-Boost.

El primero, Buck o también llamado reductor, es un convertidor de potencia que obtiene a la salida un valor de tensión menor que en su entrada.

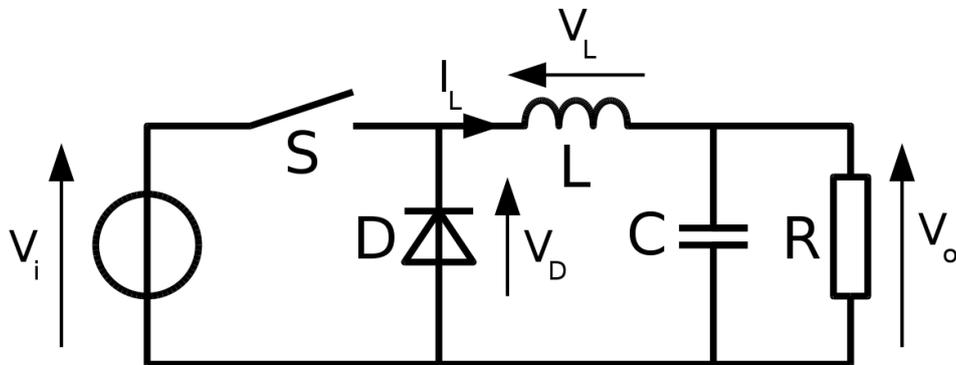


Figura 10. Esquema elèctric de un convertidor Buck

El Boost o elevador, es un convertidor de potencia que en la salida obtiene un valor de tensión mayor al de su entrada.

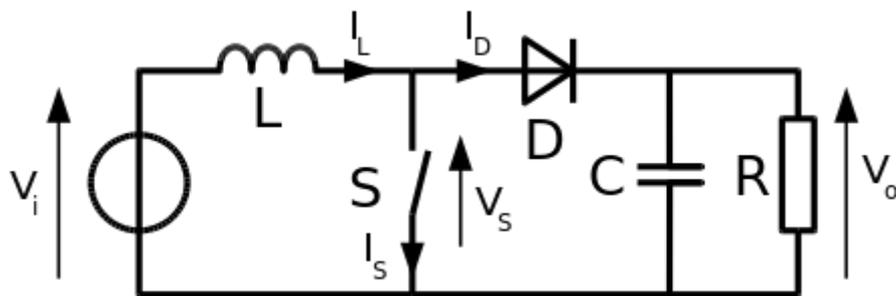


Figura 11. Esquema elèctric de un convertidor Boost

El Buck-Boost, cómo bien su nombre indica, puede tener a la vez las funcionalidades de los dos convertidores descritos anteriormente y con una forma inversora, es decir, un cambio de polaridad en la salida (signo inverso al de entrada).

Dentro de éstos, se pueden encontrar variaciones distintas cómo pueden ser, los convertidores SEPIC o Cuk.

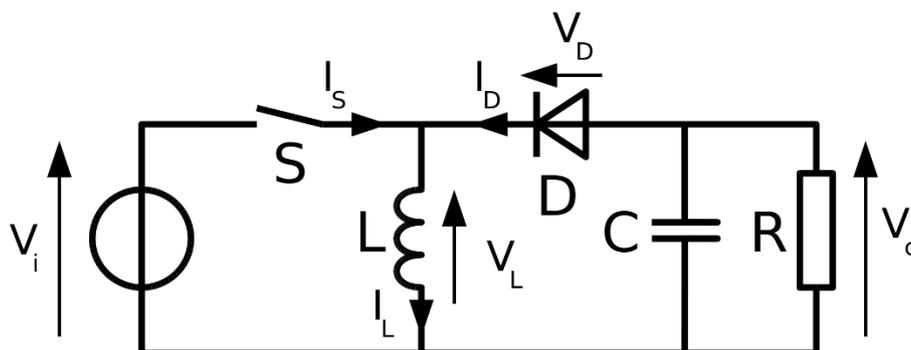


Figura 12. Esquema elèctric de un convertidor Buck-Boost

En el CubeSat, la energí provendrá directamente del Sol, captada por las placas solares y enviada al convertidor. Gran parte del tiempo, las placas solares tendrá un valor inferior al valor nominal de la baterí, es por eso que el tipo de convertidor necesario será aquel que, aumente el valor del voltaje de entrada, por lo tanto, se tendrá que decidir entre los tipos de convertidor elevadores, Boost o Buck-Boost.

La solución será el convertidor Boost, por las siguientes razones:

- Sólo será necesaria un aumento del voltaje de entrada, en ningún caso una reducción.
- No se necesita un cambio de polaridad en la tensión.

Decidido el tipo de convertidor, lonico que falta es decidir los semiconductores, tanto diodo como transistor, y de qué material será utilizado.

Hasta ahora, los transistores más utilizados han sido los de Silicio, pero el incesante y continuo desarrollo de la electrónica comporta una nueva



demanda y requerimientos tanto para la fabricación como por los materiales utilizados.

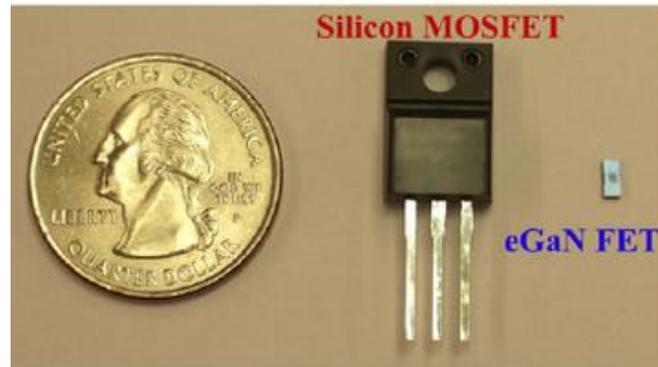
Ha llegado un punto en el que, hasta ahora material maestro por defecto, el Silicio, está llegando a sus límites, y se están buscando nuevos materiales para poder satisfacer estas nuevas condiciones. Entre ellos han aparecido el GaN (Nitruro de Galio) y el SiC (Carburo de Silicio).

3.2.1 TRANSISTOR DE GAN (NITRURO DE GALIO)

El GaN o Nitruro de Galio es una de las propuestas más interesantes para la sustitución del Silicio como material para componentes electrónicos. En comparativa, el Gan sobre el Silicio [6][7]:

- Opone menor resistencia de canal en conducción (cosa que hace que se minimicen las pérdidas por conducción).
- Puede trabajar a frecuencias de conmutación más altas, por lo tanto, menos pérdidas por conmutación.
- Menos capacitancia, que da como resultado, menos pérdidas en el momento de carga y descarga de dispositivos.
- Peso, tamaño (cómo se podrá ver en la siguiente imagen) y coste reducido.

Aunque también debido a su pequeño tamaño y por lo tanto, superficie, disminuye su capacidad de disipación de potencia.



Il·lustració 3. Comparativa de tamaño entre semiconductores de Si y GaN

3.2.2 TRANSISTOR SIC (CARBURO DE SILICIO)

Teniendo como base el Silicio, se buscaba “dopar” el material semiconductor por excelencia de manera que pudiese superar los límites del Silicio, en este caso con carbono, y el resultado es el SiC o Carburo de Silicio [8].

En comparativa con el Si, el SiC [10]:

- Permite trabajar a temperaturas más elevadas (hasta 1650°C).
- Puede soportar tensiones de bloqueo mayores (desde 1200V hasta 1700V).
- Tiene una menor resistencia de canal en conducción, lo que acarrea una disminución de las pérdidas en conducción.
- Puede trabajar a frecuencias de conmutación más altas, por lo tanto, menos pérdidas por conmutación.



3.2.3 COMPARATIVA GAN, SiC, Si

Para poder ver mejor las diferentes propiedades y características de estos tres materiales, el Si (semiconductor por excelencia) y el SiC y GaN (futuros recambios del Si), a continuación se hará una extensa comparativa.

En la siguiente tabla se puede ver la comparativa de las propiedades más interesantes sobre las cuáles se harán las comparativas [11][12][13]:

Materials Property	Si	SiC-4H	GaN
Band Gap (eV)	1.1	3.2	3.4
Critical Field 10^6 V/cm	3	3	3.5
Electron Mobility ($\text{cm}^2/\text{V-sec}$)	1450	900	2000
Electron Saturation Velocity (10^6 cm/sec)	10	22	25
Thermal Conductivity ($\text{Watts}/\text{cm}^2 \text{ K}$)	1.5	5	1.3

Tabla 2. Comparativa de los diferentes materiales [9].

-Band gap o “Brecha energética”: Está relacionada con la fortaleza de los enlaces químicos entre los átomos de la red de cada material. Cuanto mayor sea, más difícil es que un electrón salte de un anillo de valencia a otro.

La consecuencia es, corrientes de dispersión más bajas, temperaturas de operación más altas para aquellos materiales con valor más alto. Mejor eficiencia y confiabilidad de la conversión de potencia y rentabilidad. En este caso, la brecha energética (también llamada banda prohibida) del SiC y el GaN es tres veces más grande que la del Si, por lo tanto, las dos primeras pueden operar a mejores temperaturas sin sufrir tanto los efectos de la conducción y tener mejor eficiencia.

-Critical field o “Campo magnético crítico”: Es el gradiente de voltaje que el material puede soportar sin tener una “ruptura de avalancha”, el valor por el cual el material no puede obtener más voltaje.



El valor alto de esta propiedad por parte de GaN y SiC sobre Si, permite a los dos primeros operar a voltajes más altos y menor corriente de fuga.

-Electron mobility (movilidad de electrón): Es la propiedad de cómo de rápido puede un electrón moverse sobre un material.

Se puede ver en este caso que en el SiC es inferior al Si, pero el GaN es muy superior. Esto hace que el GaN pueda servir para aplicaciones con frecuencias altas.

-Electron saturation velocity (velocidad de saturación del electrón): La velocidad de saturación que pueden tener los electrones. Tanto SiC como GaN son el doble que el Si.

-Thermal conductivity (conductividad térmica): La capacidad de conducción del calor, relacionada también con su eficiencia, un alto valor de conductividad térmica significa que el material es más eficiente en la transmisión del calor.

En este caso el valor más alto lo tiene el SiC, por delante del Si y el GaN.



3.2.4 CONCLUSIONES

Las conclusiones que se pueden sacar de las comparaciones de los puntos 3.2.2 y 3.2.3 son [10]:

- Para aplicaciones para grandes frecuencias, el GaN es el mejor material, gracias a un valor de “electron mobility” mayor .
- La alta conductividad térmica combinada con una gran brecha energética hace del SiC un material muy a tener en cuenta en aplicaciones de alta potencia.
- A día de hoy, GaN será la solución para aplicaciones de grandes frecuencias, fuentes conmutadas de hasta 600V, con una eficiencia muy grande. SiC para 1000V hasta 3.3kV, aplicaciones de alto rendimiento con grandes densidades de potencia.
- De momento, por todo su camino en la historia de la electrónica, su precio y sobretodo su tamaño (la ley de Moore que cada vez se han podido hacer dispositivos más pequeños y compactos), el Si sigue estando por delante de las otras opciones.



3.3 BATERÍA

Después de captar la energía, transformarla con el convertidor, lo único restante es, almacenarla.

En base al proyecto del CubeSat del alumno de ERASMUS, se decidió utilizar la misma batería.

Esta batería es un pack de tres pilas Li-ion LiFePO₄ de 3.2 voltios cada una unidas en serie, de manera que se sumen los voltajes y dé una capacidad total de 9.6V.

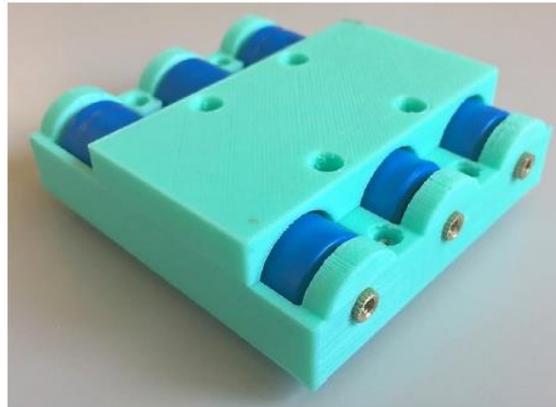


Ilustración 4. Batería, pack de pilas.

Las tres pilas están unidas mediante un molde creado por impresión 3D hecho de forma que, si fuese necesario un cambio de algunas de las pilas, fuese fácil.

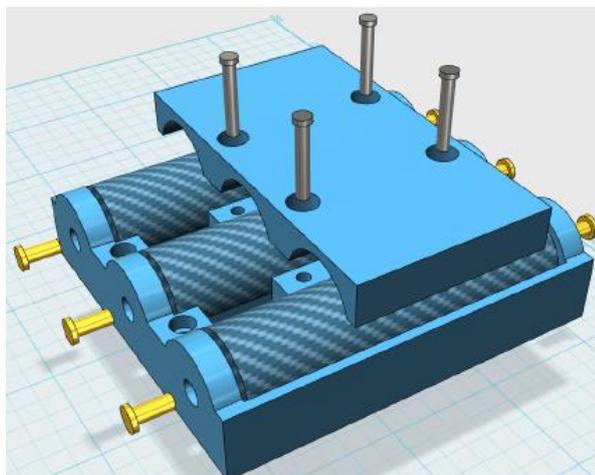


Figura 13. Extrusión 3D de la batería



3.3.1 CARGA DE BATERÍAS

Las baterías se cargarán mediante la radiación solar.

De la forma en la que se han distribuido los diferentes paneles solares por las caras del CubeSat al estar en órbita en el espacio, se asegura que siempre haya alguna cara a la que le llega la radiación solar.

Para controlar esa radiación, que será transformada en energía y almacenada en las baterías, se implementará un algoritmo MPPT (Maximum Power Point Tracking) para asegurar un perfecto funcionamiento y eficiencia, de manera que estas nunca se agoten ni se sobrecarguen cuándo ya estén al máximo de su capacidad .

Hay diferentes variantes del algoritmo MPPT, pero el escogido es el llamado MPPT P&O (Perturbación e Observación), el cual funciona tal y cómo se ve en el siguiente diagrama:

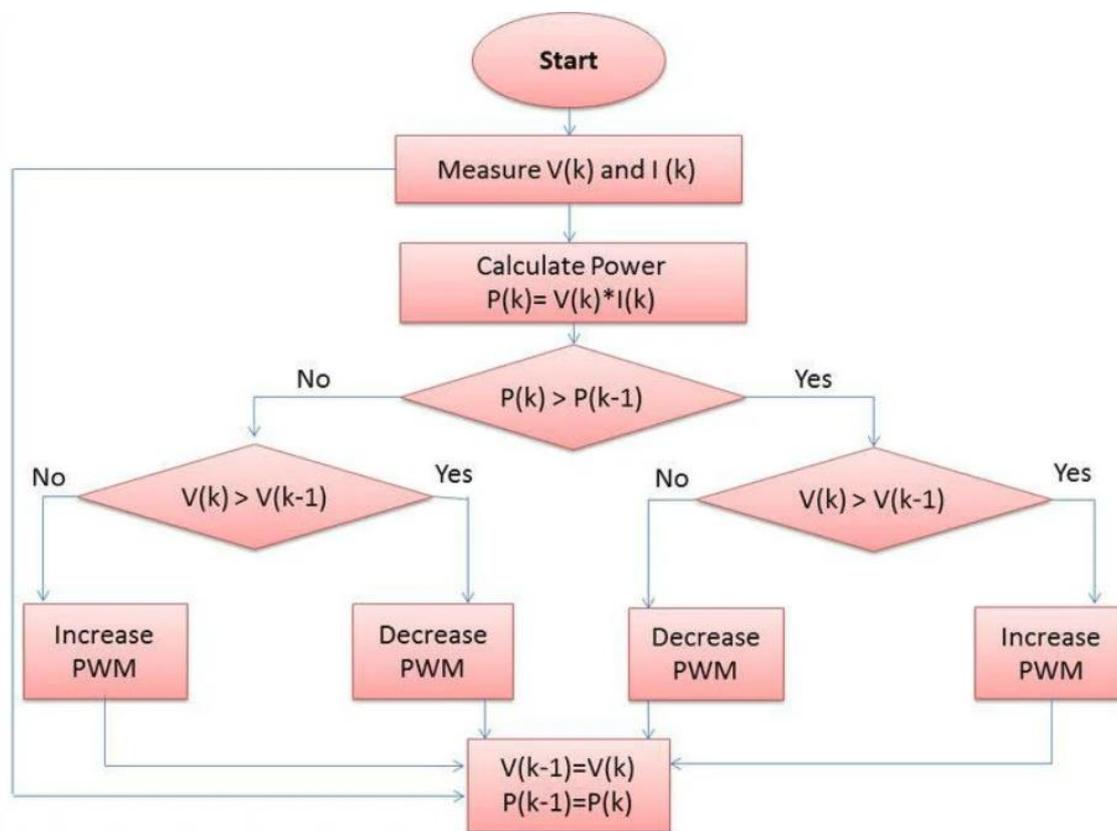


Figura 14. Diagrama MPPT P&O.



4. ESPECIFICACIONES DEL DISEÑO DEL CONVERTIDOR

La principal función del convertidor es regular la tensión de entrada de manera que pueda cargar las baterías que almacenarán y distribuirán la energía para todo el CubeSat, por lo tanto, el convertidor de la placa de potencia deberá satisfacer las siguientes necesidades:

- Tener una tensión de salida de 9.6V, para cargar el pack de baterías de LiFePo4.
- Que pueda tener una corriente de entrada variable entre 4 V y 6 V, que es el voltaje que proporcionarán las placas solares del CubeSat.
- Que pueda integrarse un MPPT, de manera que se pueda obtener la máxima eficiencia posible.
- Tener un rizado de voltaje de salida menor que 0.1V para no perjudicar al paquete de baterías.
- Que el rizado de salida de la intensidad sea menor a 2mA.
- Que tenga un 90% o más de eficiencia bajo una potencia máxima de 2W.

Las tres últimas especificaciones son para evitar dañar la placa y los diferentes componentes.



4.1 COMPLICACIONES DEL DISEÑO

En este punto se pondrá en conocimiento todas las problemáticas que ha habido a lo largo de todo el proyecto.

Primeramente acotar el proyecto.

A raíz del proyecto que sirvió como base a éste, quedaron muchos frentes abiertos y, había que decidir por qué frente iba a ir el presente proyecto.

Se pudieron distinguir más de tres proyectos y al final se decidió el actual “Estudio y diseño de la EPS de un CubeSat”.

Aun así, con tal título, se podían abarcar muchos temas. Se simplificó exponiendo que, el proyecto, era para un CubeSat como kit educacional y no uno íntegramente funcional. De esta manera, se cerraban más frentes y hacía más fácil todo el trabajo.

Después hay que hablar de todas las adversidades que hemos tenido tanto con hardware como con el software.

Tras una puesta en común con los profesores, se decidió utilizar la “Blue pill” de Arduino, gracias a sus diferentes puertos y, su velocidad de “clock”.

El profesor Lamich avisó que, para poder programar Arduino la mejor forma era mediante el SO “Linux”, ya que las últimas versiones para “Windows” daban muchos problemas, y, efectivamente no estaba equivocado.

Se instaló un ordenador remoto con SO de “Linux”, se instaló sin ningún problema el software de Arduino, pero faltaban los drivers del microprocesador “Bluepill”, además de los del depurador y programador en circuito “ST-LINK V2”.



Esos drivers están para Windows pero no para Linux, por lo tanto, ahora el trabajo se basaba en la búsqueda de los drivers.

En multitud de foros salían formas para instalarlos, pero ninguna era la forma correcta, ya que al compilar el programa e intentar pasarlo al microprocesador, obteníamos el error “Tarjeta no reconocida”.

Tras semanas buscando la combinación correcta, finalmente el profesor Manel Lamich encontró la solución y se pudo compilar y cargar todo al microprocesador.

Después de hacer las pruebas pertinentes sobre los códigos deseados, pasamos al siguiente paso, dónde era crear un código de manera que el microprocesador pudiese leer datos analógicos de voltaje.

En este momento, nuevas dificultades salieron a la luz.

Cómo antes se ha dicho, todo esto se hizo a través de una máquina virtual mediante el software “Virtual Box” y para la lectura de datos se necesitaba un puerto, al ser una máquina virtual, se tuvieron que configurar los diferentes puertos de manera que, uno leyese los datos de la fuente de alimentación, y el otro, pudiese enviar esos datos tanto al microprocesador cómo al ordenador.



5. SIMULACIÓN

Se procederá a hacer una simulación mediante el software libre “LTSpice”, de tal forma que podamos tener una mejor aproximación del comportamiento de los drivers y de la placa en sí.

Para hacer los ensayos de EMI (Interferencia electromagnética), será necesario un circuito LISN (Line Impedance Stabilizing Network), que es un pequeño circuito que se utiliza para pruebas de emisión y susceptibilidad de las radiofrecuencias, éste circuito asegura la repetitividad de las medidas y no presenta ninguna modificación de las señales de potencia.

Es, simplemente, un filtro para aquellas interferencias que pueden venir de la red eléctrica o de otros dispositivos.

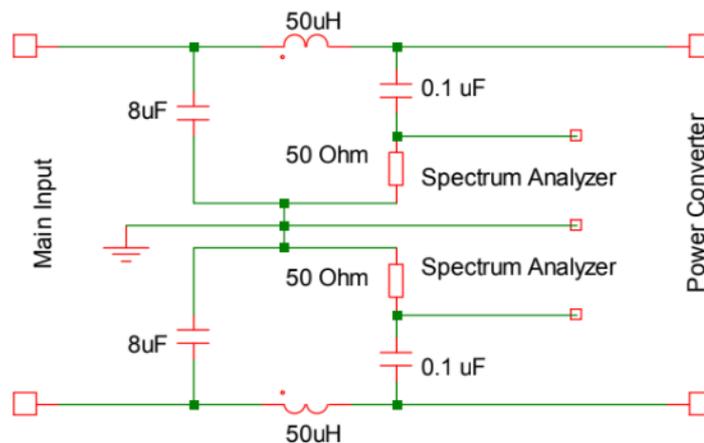


Figura 15. Esquema de un circuito LISN

Seguido al circuito LISN, se hará el convertidor tipo Boost con los dos drivers (uno de GaN y el otro de Si) y se harán las medidas con las gráficas para poder sacar resultados, y de estos, conclusiones.



5.2 DISEÑO SIMULADO

Los diseños simulados mediante el software LTSpice son los siguientes:

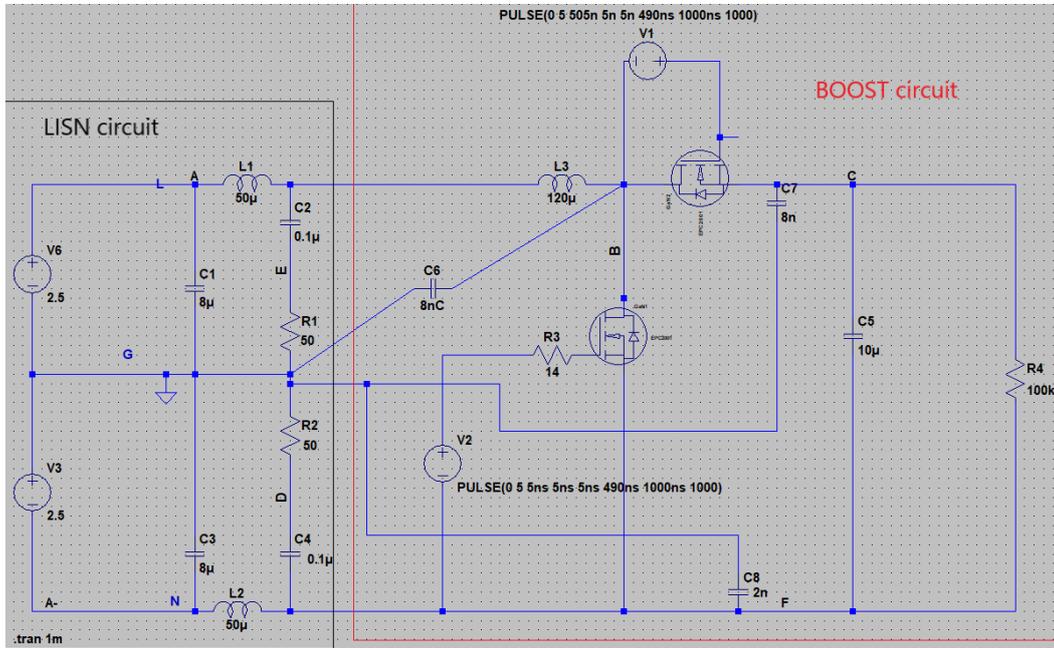


Figura 16. Esquema de simulación de GaN

Como se puede ver en el esquema, el transistor MOSFET de GaN utilizado es el EPC2001, de la misma familia que el que se implementará en la PCB (EPC2045).

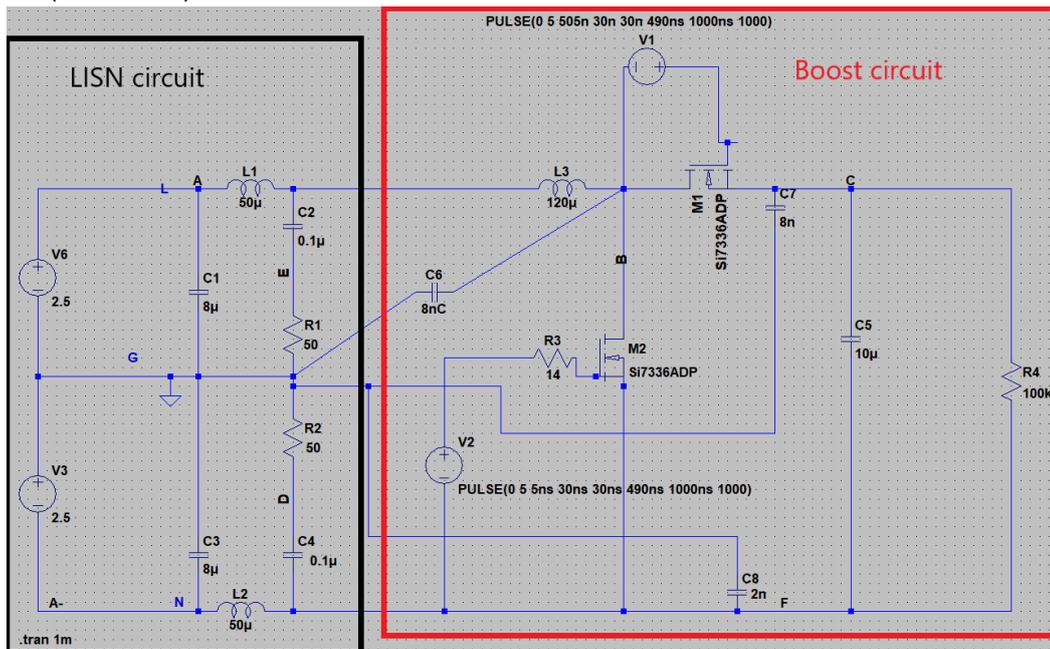


Figura 17. Esquema de simulación de Si



En el caso del silicio, se puede ver que el esquema contiene los mismos componentes, salvo dos cambios, los transistores MOSFET de GaN por los de silicio, en este caso Si7336ADP, ya que no había el modelo que se pondrá en la placa como ejemplo de transistor MOSFET en LTSpice, y el segundo los valores de tiempo de Trise y Tfall de las fuentes de tensión V1 y V2.

En ambas imágenes se pueden distinguir dos recuadros, el circuito LISN (dentro del recuadro negro), necesario para los ensayos de EMI y el esquema del convertidor boost dentro del recuadro rojo.

Hay que advertir que, un ensayo de EMI simulado nunca será igual a un ensayo físico real, ya que las interferencias del modelo real y físico de componentes, red eléctrica el simulador no las tendrá en cuenta.

Es por eso, que el esquemático no se parece al modelo simulado, y en éste se han añadido resistencias parasitarias (véase C6 de la figura 15 por ejemplo).

Aun así, se pueden sacar conclusiones y un tipo de comportamiento.

Antes de nada, hay que mirar que los pulsos V1 y V2 estén bien configurados, es decir, que cuándo uno de ellos esté en ON, el otro en OFF y viceversa.

Las características de cada fuente de tensión son las siguientes:

Vinitial[V]:	0
Von[V]:	5
Tdelay[s]:	505n
Trise[s]:	5n
Tfall[s]:	5n
Ton[s]:	490ns
Tperiod[s]:	1000ns
Ncycles:	1000

Figura 18. Valores de V1 para GaN.

Vinitial[V]:	0
Von[V]:	5
Tdelay[s]:	5ns
Trise[s]:	5ns
Tfall[s]:	5ns
Ton[s]:	490ns
Tperiod[s]:	1000ns
Ncycles:	1000

Figura 19. Valores de V2 para GaN



Vinitial[V]:	0
Von[V]:	5
Tdelay[s]:	505n
Trise[s]:	30n
Tfall[s]:	30n
Ton[s]:	490ns
Tperiod[s]:	1000ns
Ncycles:	1000

Figura 20. Valores de V1 para Si

Vinitial[V]:	0
Von[V]:	5
Tdelay[s]:	5ns
Trise[s]:	30ns
Tfall[s]:	30ns
Ton[s]:	490ns
Tperiod[s]:	1000ns
Ncycles:	1000

Figura 21. Valores de V2 para Si

La razón por la cual los valores de Trise y Tfall son diferentes en cada uno de los circuitos es la principal diferencia que hay entre los dos MOSFET, la velocidad de switching de cada uno.

El transistor de GaN pasa de 0 a 1 (y viceversa) en unos 5ns, mientras el transistor de Si lo hace en 30ns, unas 6 veces más lenta.

Y las señales que generan V1 y V2 son las siguientes:

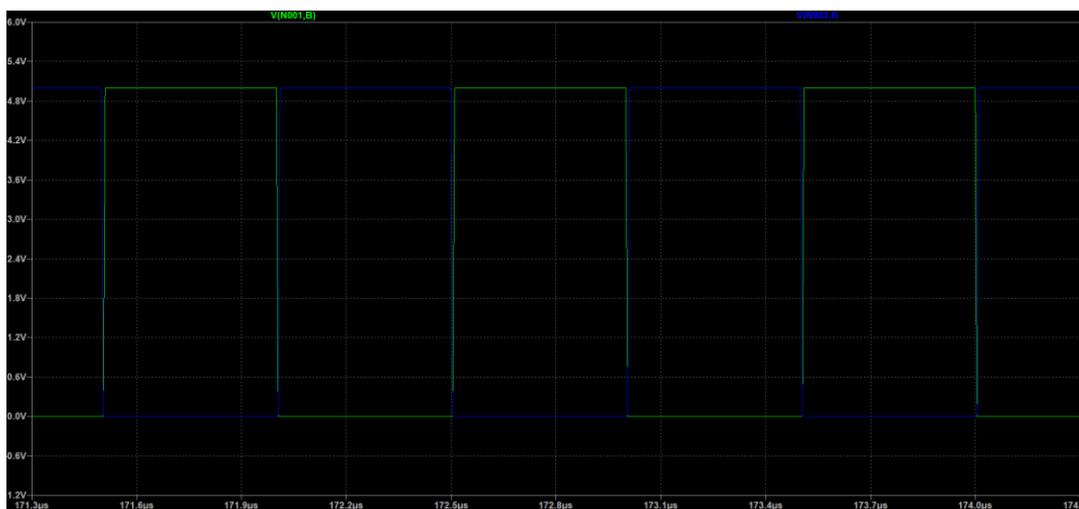


Figura 22. Gráfica tensión de V1 y V2.

En la gráfica se puede ver V1 en color verde y V2 en color azul, y cómo entre las dos generan una señal de 5V.



Para mirar el correcto funcionamiento del convertidor, se mirará la tensión de salida de éste, que, según el esquema de la figura 15, la tensión de salida será $V(c) - V(f)$.

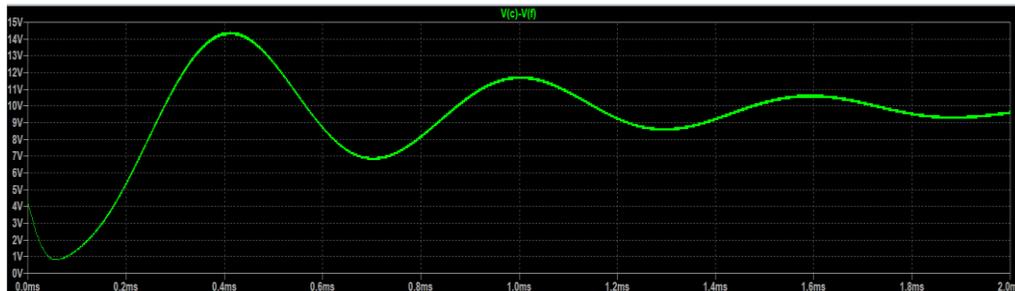


Figura 23. Gráfica del valor de salida del convertidor

En la figura 22 se puede ver que el valor después del transitorio y, con el paso del tiempo, será de 10V.

El valor del voltaje de entrada (véase figura 17) es de 5V.

Por lo tanto, ha pasado de 5V de entrada a 10V de salida, a causa de que se ha ajustado el valor del duty a 0.5.

El transistor, es un modelo de LTSpice del transistor GaN que se ha utilizado en la PCB, de manera que se pueda parecer lo máximo posible a la realidad.



5.3 RESULTADOS ESPERADOS

Antes de proceder con las simulaciones, se pueden sacar algunas conclusiones que, después de éstos podremos confirmar o rebatir.

Las EMI, cómo bien se ha explicado en el anterior punto, comprueba las perturbaciones que ocurren en el circuito. De aquí se puede deducir que, de las dos placas que tenemos (GaN y SiC) aquella que tenga una velocidad de conmutación más rápida, será quién tenga más interferencias tipo EMI.

Por parte de las EMI externas, será más difícil localizarlas, ya que, los ensayos se harán en un laboratorio y no en el espacio exterior.

Es, por culpa de esto, que es posible que las simulaciones no tengan muchas similitudes con los ensayos físicos de las placas, ya que no tienen en cuenta otros factores como pueden ser las interferencias de ondas de radio, o de los teléfonos móviles



5.4 RESULTADO DE LAS SIMULACIONES

5.3.1 SIMULACIÓN GAN

Para los ensayos de EMI, se hará una gráfica FFT en la tensión que hay en $V(e)$, con los valores establecidos en las figuras 17 y 18 :

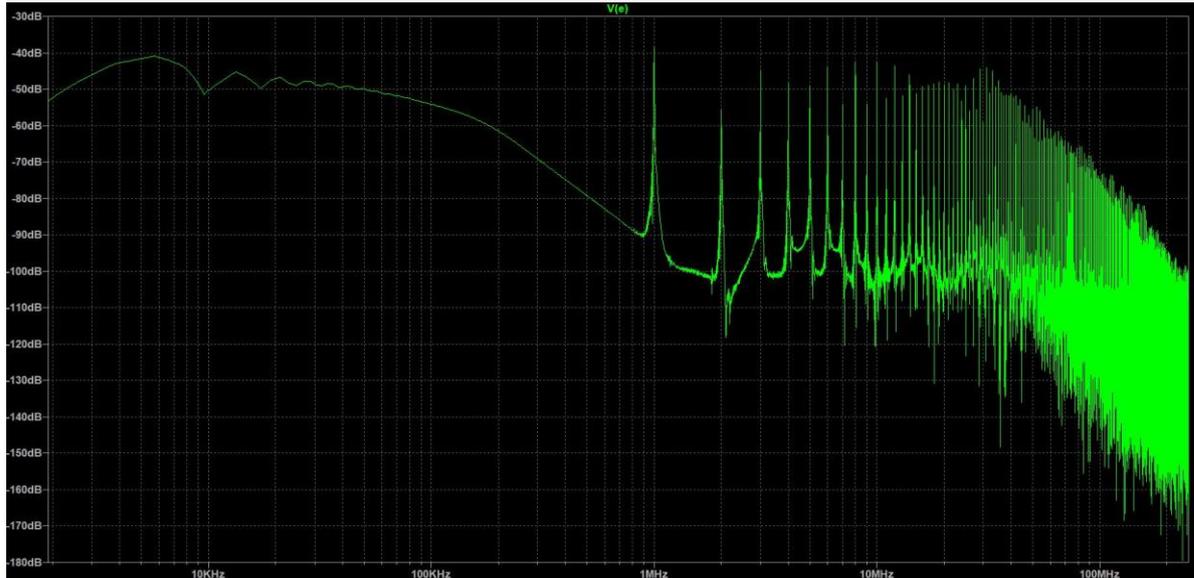


Figura 24. Gráfica FFT de $V(e)$ en GaN.

En la gráfica, se puede en eje vertical en unidades de dBV y en el eje horizontal, a escala logarítmica, unidades de frecuencia (Hz).

Pueden diferenciarse tres partes en esta gráfica (explicadas en la figura 24), una primera parte casi horizontal, entre las frecuencias 1MHz y 40MHz.

Una segunda etapa con una inclinación negativa entre los 40 MHz y los 200MHz y una última desde los 200MHz hasta 1 GHz con una pendiente negativa aún más pronunciada que la anterior.

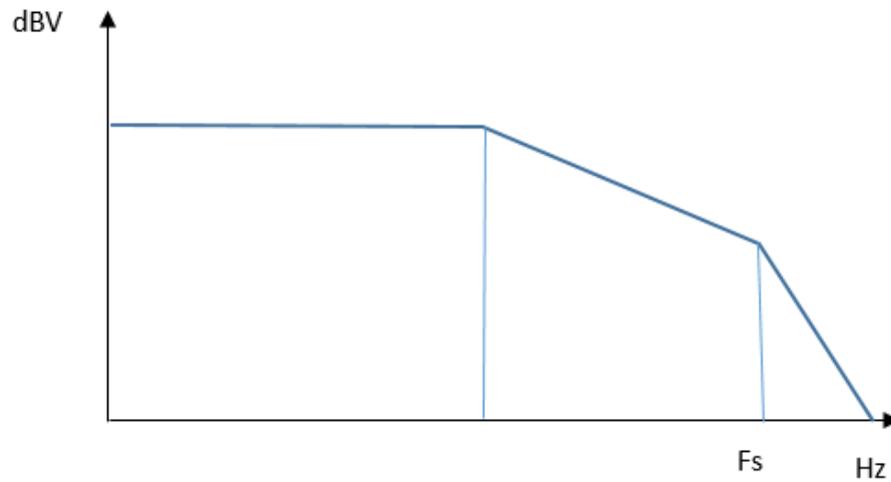


Figura 25. Etapas de una gráfica FFT

La razón por la cual, es la frecuencia de 200MHz la que divide las dos pendientes, es el transistor GaN.

Dicho transistor tiene un tiempo de subida y otro de bajada de unos 5ns (muy rápido) y, la pendiente se calcula con la fórmula $F_s = 1/T_{rise}$.

Se puede ver que a la frecuencia de 1MHz aparece un primer pico.

Este pico a esta frecuencia aparece a causa del tiempo del periodo (T_s) de las fuentes de tensión, de 1000ns.

$$\frac{1}{T_s} = \frac{1}{1000\text{ns}} = 10^6 \text{ Hz} = 1 \text{ MHz}$$



Los armónicos de rango par siempre tienen un valor de pico inferior a las impares, cómo se puede ver en la siguiente imagen:

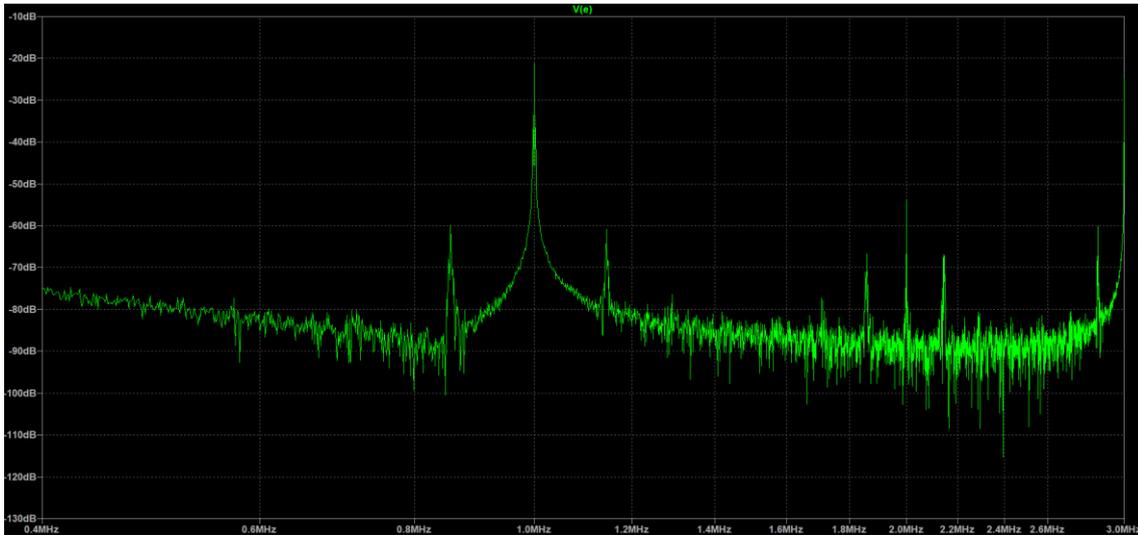


Figura 26. Gráfica FFT de V(e) de GaN acotada.

Los valores son los siguientes:

Frecuencia	dBV
1MHz	-21dBV
2MHz	-54 dBV

Tabla 3. Valores armónicos FFT en GaN

5.3.2 SIMULACIÓN SI

Para las EMI del circuito con transistor MOSFET de silicio, se siguen los mismos pasos que en la de GaN, el primero, sacar la función FFT del valor de tensión en V(e).

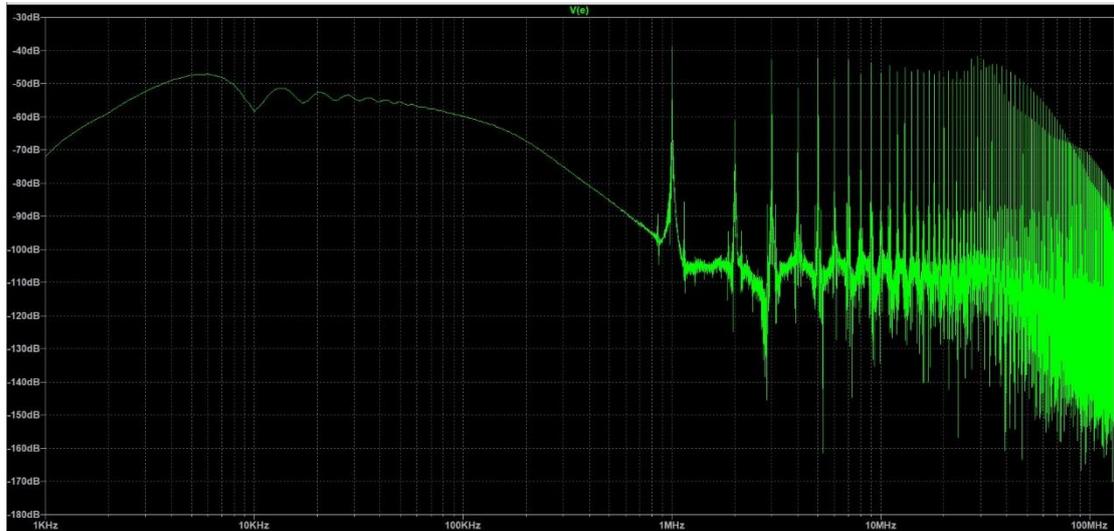


Figura 27. Gráfica FFT del valor de tensión de V(e) con el MOSFET de Si

Cómo se ha dicho en el pasado punto (5.2) y se ha podido ver en las figuras 15 y 16, los componentes y su distribución en los dos esquemas eléctricos (GaN y Si), es la misma, salvo las dos fuentes de tensión V1 y V2 (figuras 19 y 20).

Es por eso que se puede apreciar que, igual que en la simulación del GaN, a la frecuencia de 1MHz aparece un primer pico y que, en los armónicos pares, el valor éste, es siempre menor a los valores de los armónicos impares.

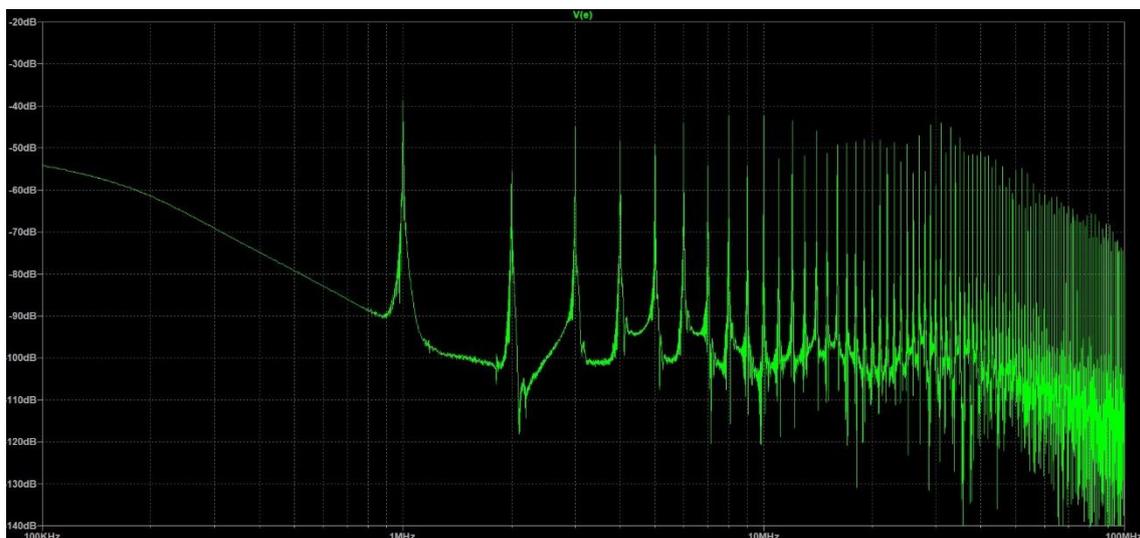


Figura 28. Gráfica FFT de V(e) de Si acotada.



Los valores del primer y segundo armónico son los siguientes:

Frecuencia	dBV
1MHz	-39,18dBV
2MHz	-58,45 dBV

Tabla 4. Valores armónicos FFT en Si

Si se mira las diferentes etapas de una gráfica FFT (figura 22) se puede ver que el valor de $F(s)$ ahora ha cambiado.

Dicho valor es el siguiente:

Teniendo en cuenta que $F_s = 1/T_{rise}$, $F_s = 1/30ns$, son 33MHz.

Es ahora, en esa frecuencia, dónde se puede ver un cambio de pendiente.

5.5 CONCLUSIÓN DE RESULTADOS

Después de las dos simulaciones de los circuitos, así como las gráficas FFT de ambos.

Se puede sacar en conclusión que:

- Los resultados esperados en el punto 5.3 se cumplen, son correctos. El valor del primer armónico en GaN es de -21 dBV mientras que el de Si es de -39.18 dBV.

Normalmente estos valores se muestran en unidades de dBmV, a lo que se debería sumar (a los valores con unidades de dBV) 120 dB.

Añadiéndolo, se tiene que, para el GaN el valor en dBmV es de 99 dBmV y el de Si, 80.82 dBmV.

La razón, la diferencia de velocidad de switching de un transistor y otro (también explicado en la tabla 2 del punto 3.2.3).



- La pendiente de la última etapa es mucho más pronunciada en el GaN que en el Si, por la diferencia en el tiempo que tiene uno y otro en pasar de 0 a 1 (y viceversa). Mientras el GaN tiene el valor de $F(s)$ en 200MHz, el Si lo tiene en 33.33MHz.

Después de ver las comparaciones entre una y otra simulación, se tendrá que ver si cumplen con la normalización internacional de interferencias electromagnéticas, el CEIPR (Comité Especial Internacional de Perturbaciones Radioeléctricas).

En este caso, el estándar CISPR 22, a la norma europea EN 55022, que define un límite para las interferencias.

Lo que dice dicha normalización es, que para hasta frecuencias de 30 MHz, las perturbaciones, no tienen que pasar de unos límites, que son los siguientes [14]:

CISPR 22 CLASS A CONDUCTED EMI LIMIT

FREQUENCY OF EMISSION (MHZ)	CONDUCTED LIMIT (DBMV)	
	Quasi-peak	Average
0.15 - 0.50	79	66
0.50 - 30.0	73	60

CISPR 22 CLASS B CONDUCTED EMI LIMIT

FREQUENCY OF EMISSION (MHZ)	CONDUCTED LIMIT (DBM;V)	
	Quasi-peak	Average
0.15 - 0.50	66 to 56	56 to 46
0.50 - 5.00	56	46
5.00 - 30.0	60	50

Tabla 5. Límites establecidos por CISPR de clase A y B.

De la norma CISPR 22 hay dos clases, la A y la B. La diferencia entre una y otra es que, la clase B son para dispositivos que están diseñados o tienen una finalidad de uso doméstico y las de clase A no.



Por lo tanto, en este caso, se tendrán que comparar con los valores de clase A.

Las gráficas de las dos FFT acotadas hasta los 30MHz son las siguientes:

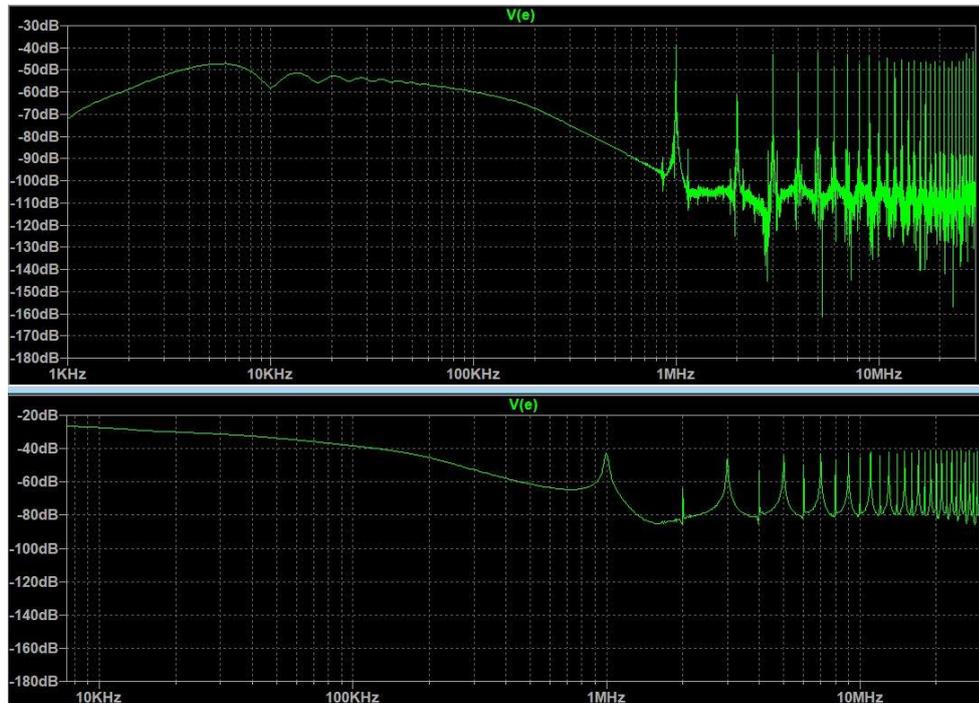


Figura 29. Comparación de las gráficas FFT acotadas a 30MHz.

Recogiendo los datos antes calculados (en el punto 5.5) del valor del primer y segundo armónico de ambas simulaciones (tablas 3 y 4), los valores del primer armónico para GaN son 99 dBmV y para el Si 80.82 dBmV y, estos resultados comparados con los límites de CISPR 22 para la clase A, en el intervalo de 0.50 MHz – 30 MHz, ya que el primer armónico aparece en 1 MHz, ambos lo superan.

Esto puede acarrear que haya problemas en los circuitos, por lo tanto, si se quisieran evitar estos problemas, la solución más fácil sería la de implementar un filtro en la placa para evitar esos picos que superas los límites establecidos por CISPR (tabla 5).



6. PLANIFICACIÓN Y PRESUPUESTOS

6.1 DIAGRAMA DE GANTT

Este era el plan esperado para el proyecto completo por fechas:

Activitats	Data inici	Duració (dies)	Data final
Reunió Inicial i definició del projecte	13-feb	1	13-feb
Recollida de informació	14-feb	14	28-feb
Posta en comú de la informació	28-feb	1	28-feb
Començament Project Charter	01-mar	14	15-mar
Primers esquemes i dissenys	16-mar	7	22-mar
Discussió i selecció de propostes	23-mar	14	05-abr
Lliurament Project Charter	22-mar	1	22-mar
Primer seguiment	29-mar	1	29-mar
Configuració del software	07-abr	9	16-abr
Busca i compra dels components per la PCB	07-abr	7	14-abr
Implementació del disseny a PCB	15-abr	7	22-abr
Assajos del projecte	23-abr	7	30-abr
Segon seguiment	26-abr	1	26-abr
Elaboració de resultats i conclusions dels assajos	01-may	14	15-may
Finalització de la memòria	16-may	21	07-jun
Tercer seguiment	17-may	1	17-may
Lliurament final	10-jun	1	10-jun

Tabla 6. Actividades y fechas del proyecto

Todas estas actividades por fechas y duración, crea un diagrama de Gantt que es el siguiente:

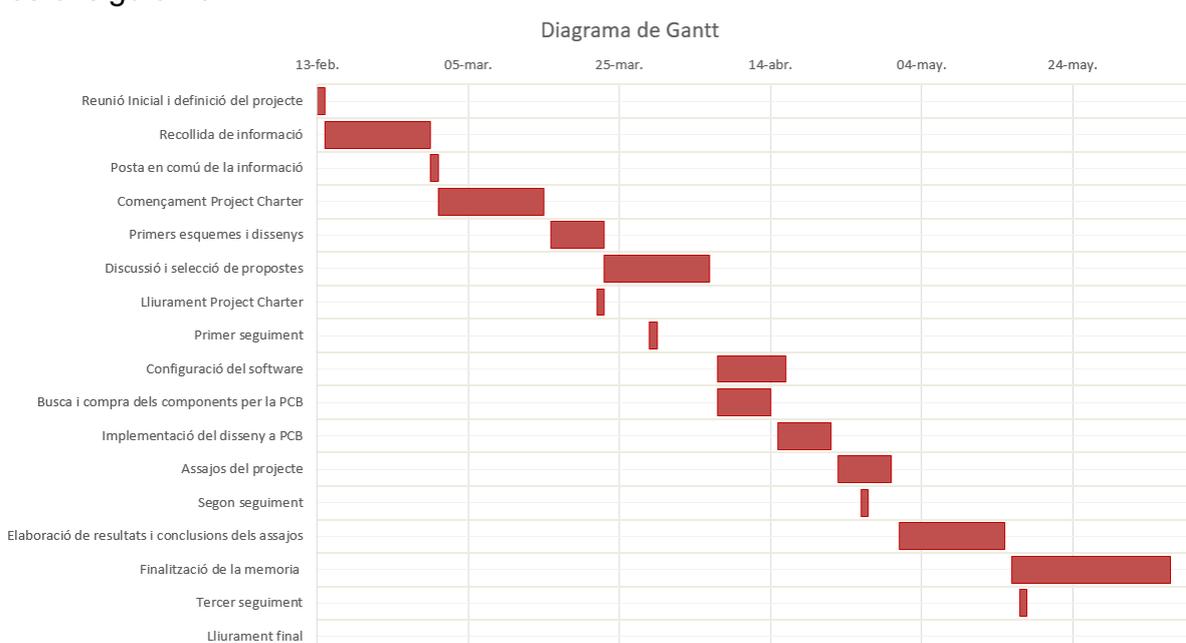


Figura 30. Diagrama de Gantt



Finalmente no se pudieron acatar las fechas, debido a las múltiples problemáticas que surgieron semana tras semana, retrasando las diferentes actividades creando un cuello de botella en ellas.

Por lo tanto , en cuánto a las diferentes actividades representadas, también hubieron cambios a última hora para poder llegar al día de la entrega, así cómo los días de duración también.

6.2 BOM (BILL OF MATERIALS)

Los componentes utilizados para las dos placas según las especificaciones aportadas por el proyecto de Antoine se pueden ver en la siguiente imagen:

Quantity	Designator	Value	Voltage	Tolerance	Current	ESR	Power	Description	Part number
2	C12, C25	100pF	25V	10%				MLCC capacitor	C1206C101K3HACTU
2	C13, C26	10nF	50V	10%				MLCC capacitor	885012208081
8	C2, C3, C5, C11, C15, C16, C18, C24	100nF	25V	10%				MLCC capacitor	885012208058
14	C1, C4, C6, C7, C8, C9, C10, C14, C17, C19, C20, C21, C22, C23	3.3uF	50V	20%		0.2		Tantalum capacitor	T521B335M050ATE200
2	L1, L2	120uH		20%	1.2A	0.355		Power inductor	74404084121
8	P1,P2, P3, P5, P7, P8, P9, P11	Header, 2-Pin						Header, 2-Pin	
4	P4, P6, P10, P12	Header, 4-Pin						Header, 4-Pin	
2	Q1, Q2	NTMFS6B05NT1G	100V		104A	0.0065	138W	Power Si MOSFET	NTMFS6B05NT1G
2	Q3, Q4	EPC2045ENGRT	100V		16A	0.007		Power GaN MOSFET	EPC2045ENGRT
4	R4, R6, R12, R14	10 Ω	200V	1%			0.25W	Thick-film resistor	CR1206-FX-10R0ELF
4	R2, R3, R10, R11	10k Ω	200V	5%			0.25W	Thick-film resistor	RCG120610K0JNEA
2	R5, R13	100k Ω	200V	1%			0.25W	Thick-film resistor	CRCW1206100KFKEAC
2	R7, R15	200k Ω	200V	1%			0.25W	Thick-film resistor	CR1206-FX-2003ELF
2	R1, R9	0						Thick-film resistor	RCG12060000Z0EA
16	R8, R16	0.1 Ω		1%			0.5W	Current shunt	CRM1206AFX-R100ELF
2	U1, U2	MAX20307EWL+							MAX20307EWL+

Tabla 7. BOM (Lista de componentes)



Estos son todos los componentes necesarios para satisfacer todas las especificaciones de diseño que se buscaban en el diseño de la placa (punto 4), pero hay que tener en cuenta que puede haber cambios, por componentes en mal estado y/o que se tengan que substituir por otros.

Lo que también se ha buscado ha sido, crear un mismo esquema y un mismo ensamblaje de los componentes de manera que al tener las dos PCB (la de GaN y la de Si) tuvieran la misma distribución y lo único que cambiase fuese el transistor.

En el siguiente apartado se mostrará el diseño definitivo de cada una de las placas y los componentes.



7. DISEÑO DEFINITIVO

A continuación, unas imágenes de los esquemas definitivos y el layout (que es la forma real en la que se establecen las conexiones entre componentes en la placa) enviado a ensamblar para la PCB de cada una de las dos placas:

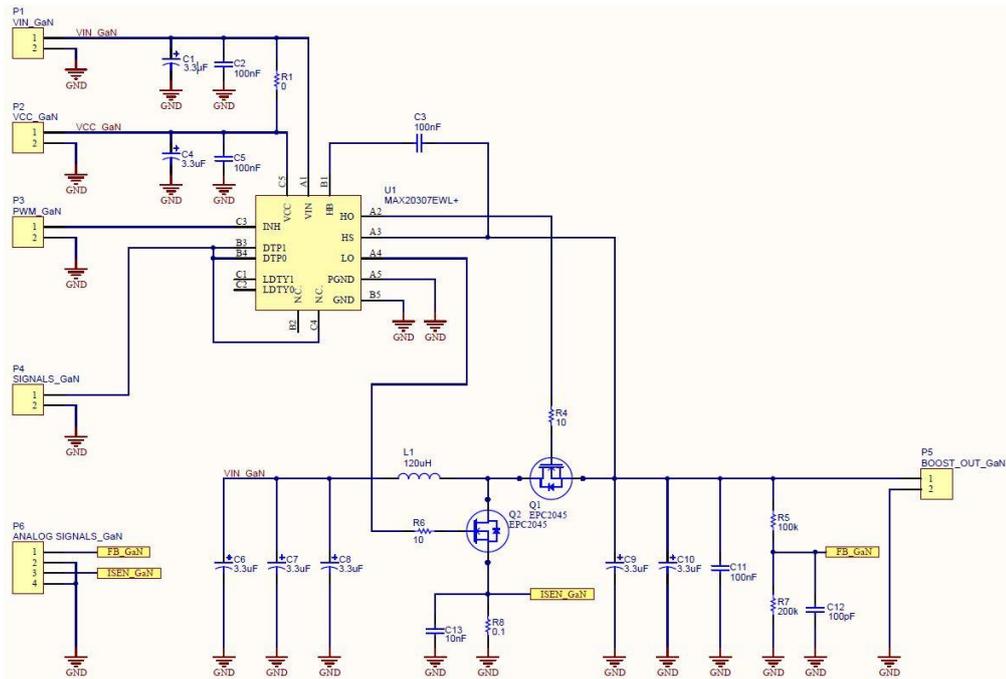


Figura 31. Esquema eléctrico de GaN

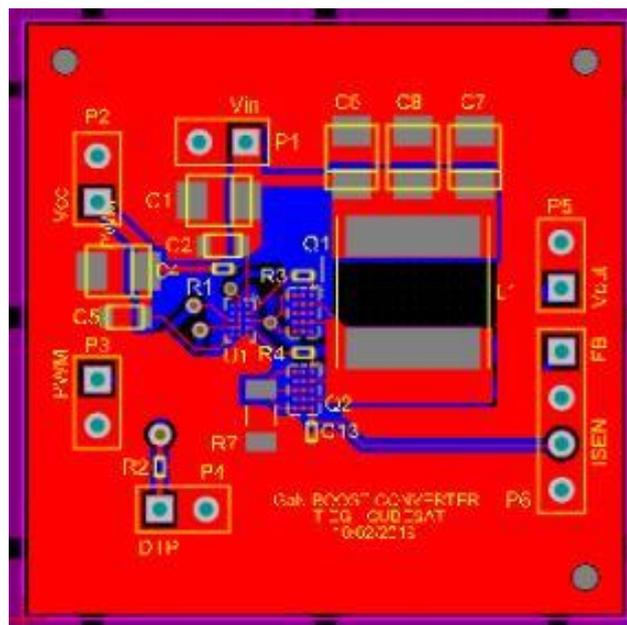


Figura 32. Layout de la PCB de GaN

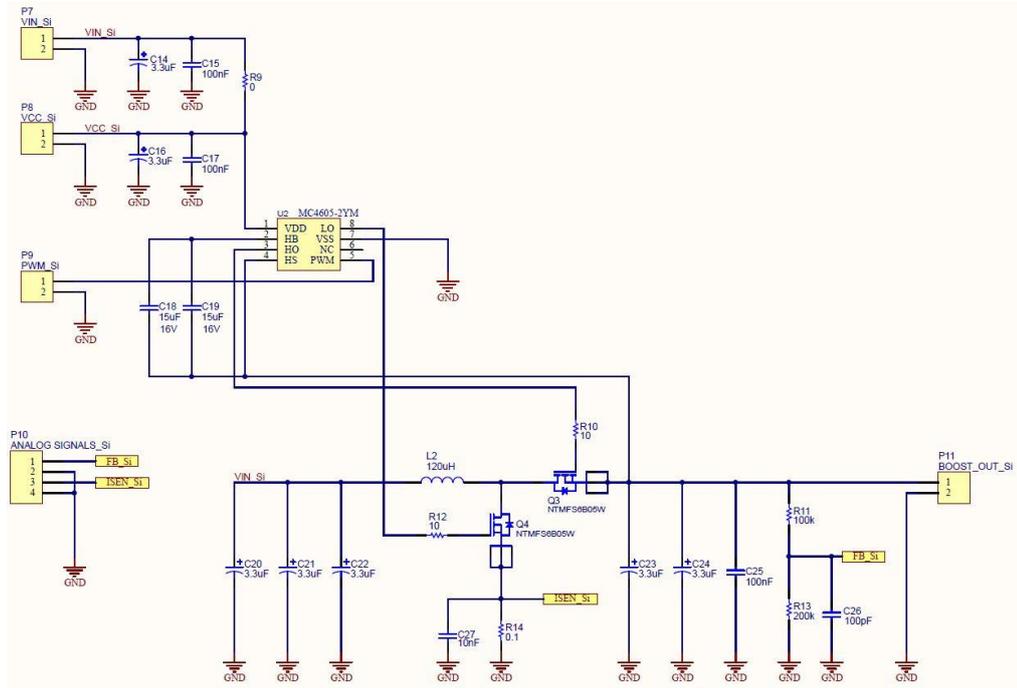


Figura 33. Esquema elèctric de Si

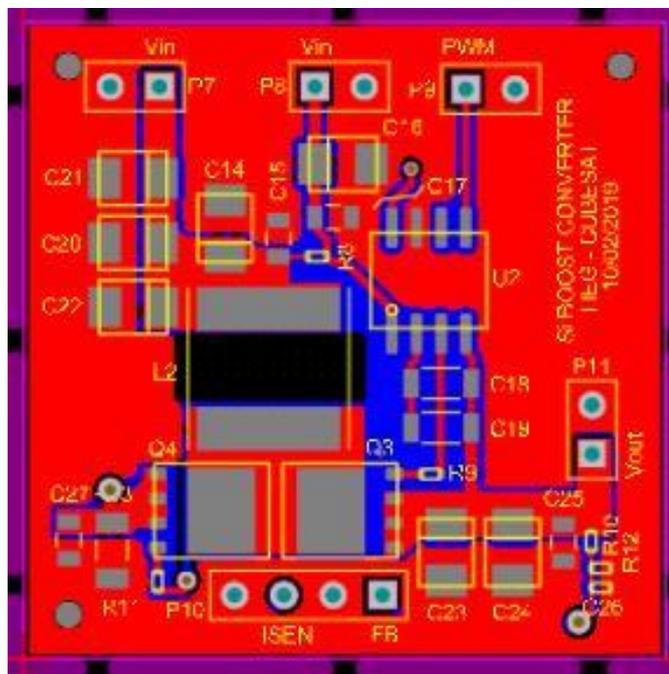


Figura 34. Layout de la PCB de Si



Lo que se ha intentado hacer en ambos diseños era, poder aprovechar los componentes seleccionados para poder ponerlos con una distribución igual, de manera que lo único que cambiase entre un convertidor y otro, eran los transistores.

De esa manera, las diferencias que se podrían encontrar entre los ensayos de una placa y otra fuesen, gran parte, por la diferencia entre el transistor de GaN y el de Si , minimizando las diferencias que se podrían crear al tener una distribución diferente.

A la hora de crear el Layout, optimizar el espacio que estaba disponible para la implantación de los circuitos de manera que se pudiesen hacer el mínimo número de pistas posibles y estar dentro de los límites establecidos para el CubeSat.



9. BIBLIOGRAFIA

- [1] Hacia el Espacio, “CubeSats : La gran oportunidad para el acceso al espacio”
<<https://haciaelespacio.aem.gob.mx/revistadigital/articul.php?interior=289>>, 16 de Febrero de 2019.
- [2] Arafa Aldaw Mohammed Abaker , Dr. Amin Babiker Abd AlNabi Mustafa
“Analysis of Cube-Sat Electrical Power System Architecture”
< https://techhorizon.fu.edu.sd/wp-content/uploads/2018/02/arafa_p2-1.pdf>, 13 Febrero 2019
- [3] Robert Burt, “Distributed EPS in a CubeSat Application”
<<https://pdfs.semanticscholar.org/9c6b/23fef0823f801f66a2b040cf0f850a21ea74.pdf>>, 7 Marzo de 2019
- [4] Angela Chen , “Gallium nitride is the silicon of the future”
<<https://www.theverge.com/2018/11/1/18051974/gallium-nitride-anker-material-silicon-semiconductor-energy>>, 8 de Marzo de 2019.
- [5] SLMD121H10L Datasheet
<http://ixapps.ixys.com/DataSheet/SLMD121H10L_Nov16.pdf>, 12 Abril de 2019.
- [6] Nick Powers, “Los semiconductores de banda prohibida ancha ya están listos para los desafíos del futuro” <<https://www.arrow.com/es-mx/research-and-events/articles/wide-band-gap-semiconductors-are-ready-now-for-tomorrows-challenges>>
- [7] Chema Molina (2018) “Semiconductores del futuro, GaN”
<<https://medium.com/@txema72000/semiconductores-del-futuro-gan-4e741729cf5>>, 18 Octubre 2018.



- [8] Richardson FRDP, “GaN vs SiC in high frequency and power switching applications” <http://www.richardsonrfd.com/resources/RelDocuments/SYS_26/Microsemi-A-Comparison-of-Gallium-Nitride-Versus-Silicon-Carbide.pdf>, 12 Diciembre de 2018.
- [9] Javier Chavarría, Domingo Biel, Francesc Guinjoan, Alberto Poveda, “Evaluación comparativa entre el uso de MOSFETs de SiC y de Si en un emulador fotovoltaico”, <<https://docplayer.es/55331682-Evaluacion-comparativa-entre-el-uso-de-mosfets-de-carburo-de-silicio-sic-y-de-silicio-si-en-un-emulador-fotovoltaico.html>>, 9 de Abril de 2019.
- [10] Cree Inc. , “Comparison of Sic to other Semiconductors” <https://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/semi_en/kap_a/illustr/ia_1_2.html>, 9 Abril de 2019.
- [11] ROHM, “Physical properties and characteristics of SiC”, <<https://www.rohm.com/electronics-basics/sic/what-are-sic-semiconductors>>, 9 Abril de 2019.
- [12] Steve Taranovich, “Si vs GaN vs SiC: Which process and supplier are best for my power design?” , <<https://www.edn.com/design/power-management/4409627/Si-vs--GaN-vs--SiC--Which-process-and-supplier-are-best-for-my-power-design->>, 12 de Enero de 2019.
- [13] GaN Systems, “SiC vs GaN head-to-head performance comparison”, <<https://gansystems.com/newsroom/sic-vs-gan-head-head-performance-comparison/>>, 15 Diciembre de 2018.
- [14] Electronics Notes, “CISPR 22: EN55022 EMC STANDARD”, <https://www.electronics-notes.com/articles/analogue_circuits/emc-emi-electromagnetic-interference-compatibility/cispr22-en55022-standard.php>, 20 de Mayo del 2019.
- [15] Lanzamientos de CubeSats, < <https://www.nanosats.eu/#figures>>, 9 Febrero de 2019.



[16] Elizabeth Howell , CubeSats: Tiny Payloads, Huge Benefits for Space Research, <<https://www.space.com/34324-cubesats.html>>, 19 de Febrero de 2019.

[17] Leonard David, Cubesats: Tiny Spacecraft, Huge Payoffs <<https://www.space.com/308-cubesats-tiny-spacecraft-huge-payoffs.html>>, 19 de Febrero de 2019.

[18] Robin Mitchell, Is GaN replacing Silicon? , <<https://www.allaboutcircuits.com/news/GaN-replace-silicon-applications-limitations-gallium-nitride/>> , 20 Febrero de 2019.