



UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO NEGRO

PROYECTO FINAL INTEGRADOR

**Diseño de una
Radio Definida por Software**

Hecho por:

Omar López Cabrera

Director: Ing. Franco Alcaraz

Codirector: Ing. Federico Tula

Para el título de Ingeniería Electrónica

Índice

Índice de figuras	IV
Índice de tablas	V
Lista de acrónimos	VI
Resumen	VIII

Tabla de contenido

1. Introducción	1
1.1 ¿Que es una radio definida por software?	1
1.2 ¿Por qué utilizar radios definidas por software?	1
1.3 Aplicaciones y características de las SDR	1
1.4 Comparativa entre Radios Definidas por Software y Radio Definidas por Hardware.	2
1.5 Objetivos de la tesis.	2
1.6 Metodología de diseño	4
2. Diseño	6
2.1 Arquitectura general según funciones	6
2.1.1 Antenas	7
2.1.2 RF Front-End	7
2.1.3 DAC y ADC.	8
2.1.4 Digital Front-End	8
2.1.5 CPU	9
2.1.6 Memoria	10
2.1.7 Conexiones externas	11
2.1.8 Interfaces.	11
2.1.9 Alimentación	11
2.2 Arquitectura definida	11
2.2.1 RF Front End & Digital Front End	12
2.2.2 USB 3.0	14
2.2.2.1 Información general USB 3.0	15
2.2.2.2 Controlador USB 3.0 CYUSB3014	16
2.2.3 CPU	18
2.2.3.1 Selección de FPGA	18
2.2.3.2 Pin Out y encapsulado	21
2.2.3.3 Función	22

2.2.3.4 Configuración FPGA.....	22
2.2.3.5 Alimentación FPGA.....	22
2.2.4 Memoria DDR3.....	23
2.2.5 Alimentación SDR.....	23
2.2.6 GPIO y Leds.....	25
2.3 SDR a nivel sistema.....	25
2.3.1 HDL.....	26
2.3.2 Programación FPGA.....	27
2.3.3 SDR transmisión y recepción Half Duplex.....	30
2.3.4 SDR transmisión y recepción Full Duplex.....	31
2.3.5 Software.....	32
2.3.5.1 Drivers.....	32
2.3.5.2 GNU Radio.....	33
2.4 SDR Características.....	34
3. Diseño con herramienta CAD.....	36
3.1 Herramienta CAD.....	36
3.1.1 Esquemático.....	36
3.1.2 Componentes.....	37
3.2 Conexiones.....	37
3.2.1 FPGA.....	38
3.2.1.1 Bancos I/O.....	38
3.2.2 Power.....	38
3.2.3 Transceiver AD9364.....	39
3.2.4 USB 3.0.....	39
3.3 Capacidades del fabricante PCB.....	39
3.4 Distribución de componentes y características físicas.....	40
3.5 Stackup.....	41
3.6 Líneas de transmisión.....	44
3.7 Impedancia característica, reflexión y terminación.....	44
3.8 Líneas diferenciales.....	46
3.9 Ajuste de longitudes.....	47
3.10 Consideraciones tomadas al Rutear la placa.....	48
3.10.1 FPGA.....	48
3.10.2 Power.....	48
3.10.3 USB 3.0.....	48
3.10.4 AD9364.....	49

3.11 Planos de alimentación y tierra.....	49
3.12 Capacitores desacople	50
3.13 Modelo 3D.....	52
4. Sumario	54
4.1 Simulación de integridad de la señal.....	54
4.2 Fabricación y ensamblado del PCB.....	54
4.3 Software	55
4.4 Posibles Mejoras	55
5. Anexos	57
5.1. Hardware Design Guidelines.....	57
5.1.1. USB 3.0	57
5.1.2. FPGA	59
5.1.3. Memory DDR3	60
5.1.4. Transceiver AD9364	68
5.2. Cuestiones generales del diseño	68
5.2.1. Alimentación	68
5.2.2. AD9364	69
5.3. Herramientas utilizadas durante el diseño.	76
5.3.1. Estimación consumo FPGA.....	76
5.3.2. Programa ADP5054 criterio más eficiente	78
5.3.3. Calculo de corriente por vías.....	79
5.3.4. Calculo Impedancia diferencial	80
5.3.5. Uso de herramienta xSignals.....	81
5.3.6. Coplanar waveguide y ajuste de impedancia.....	83
5.4. Simulaciones.....	84
5.4.1. Simulaciones Power	84
5.4.2. Simulaciones etapa de RF AD9364 con ADS.....	85
5.5. Información general y hoja de datos	92
5.5.1. Recomendaciones por parte de los principales IC	92
5.5.2. Capacidades Fabricante PCB Prototype	92
5.5.3. Información sobre conexiones de cada sección.....	93
5.5.4. Esquemático, Gerbers, BOM	93
Referencias	94
Bibliografía	96

Índice de Figuras

Figura 1-1: Etapas del proyecto.....	3
Figura 1-2: Esquema de funcionamiento receptor FM	3
Figura 1-3: Esquema de funcionamiento comunicación punto a punto.....	4
Figura 1-4: Diagrama metodología de diseño Top-Down	4
Figura 2-1: Diagrama en bloques de la arquitectura general de la SDR	6
Figura 2-2: Ejemplo patrón de radiación de una antena	7
Figura 2-3: Proceso de diezrado	9
Figura 2-4: Proceso de interpolación	9
Figura 2-5: Comparativa entre los posibles CPUs	10
Figura 2-6: Diagrama en bloques de la Arquitectura definida del hardware de la SDR.....	11
Figura 2-7: Diagrama de arquitectura definida, sección transceiver	13
Figura 2-8: Cables USB 3.0.....	15
Figura 2-9: Diagrama en bloques controlador USB 3.0.....	16
Figura 2-10: Diagrama en bloques receptor QAM	19
Figura 2-11: Modelo de FPGA seleccionado	20
Figura 2-12: Pin Out I/O FPGA.....	21
Figura 2-13: Diagrama distribución de tensiones.	24
Figura 2-14: Pines de propósito general	25
Figura 2-15: Esquema funcional SDR.....	26
Figura 2-16: Programación de la FPGA.....	28
Figura 2-17: Diagrama en bloques configuración FPGA.....	28
Figura 2-18: Diagrama de tiempos, configuración FPGA	29
Figura 2-19: Esquema transmisión de la SDR.....	30
Figura 2-20: Esquema Recepción de la SDR	31
Figura 2-21: Esquema de operación Full Duplex.....	32
Figura 2-22: Hardware y drivers del sistema.....	32
Figura 2-23: Receptor de FM, GNU Radio	34
Figura 2-24: Potencia salida transceiver	35
Figura 2-25 : Bandas y asignaciones de frecuencia.....	35
Figura 3-1: Esquemático en forma jerárquica, primer sheet.	36
Figura 3-2: Información componentes del esquemático	37
Figura 3-3: Interface de los bancos de la FPGA.....	38
Figura 3-4: Restricción distancia mínima en PCB	39
Figura 3-5: Restricciones tamaño agujero en PCB	39
Figura 3-6: Espacio disponible en componentes BGA.....	40
Figura 3-7: Ejemplo de ruteo, componente BGA	40
Figura 3-8: Distribución de los componentes en la placa	41
Figura 3-9: Stack up del PCB.....	44
Figura 3-10: Microstrip.....	45
Figura 3-11: Strip line	45
Figura 3-12: Propiedad de las líneas diferenciales.....	46
Figura 3-13: Líneas diferenciales en PCB.....	47
Figura 3-14: Ejemplo ruteo líneas de datos, memoria DDR3.....	47
Figura 3-15: Plano1 de power	49
Figura 3-16: Plano2 de power	50

Figura 3-17: Plano solido GND	50
Figura 3-18: Ubicación capacitores desacople FPGA	51
Figura 3-19: Modelo 3D placa, vista superior	52
Figura 3-20: Modelo 3D placa, vista inferior	53
Figura 4-1: Diagrama de conexión, mejora etapa RF	56
Figura 5-1: Recomendación ruteo capacitores en líneas SS del USB 3.0	58
Figura 5-2: Recomendación ruteo líneas de USB3.0	58
Figura 5-3: Fanout recomendado de la FPGA	59
Figura 5-4: Recomendación ruteo BGA de la FPGA.....	60
Figura 5-5: Distribución señales memoria DDR3.....	63
Figura 5-6: Modelo de vía	64
Figura 5-7: Recomendación ubicación capacitores desacople de la memoria DDR3	66
Figura 5-8: Ruteo líneas de memoria DDR3	67
Figura 5-9: Fanout recomendado para el AD9364.....	68
Figura 5-10: Vías de escape térmico.	69
Figura 5-11: Headers para el control de la alimentación por etapas.....	69
Figura 5-12: Shielding sección de RF	70
Figura 5-13: Esquemas de interface transceiver-antena para Rx.	70
Figura 5-14: Esquemas interface transceiver-antena en Tx.....	71
Figura 5-15: Impedancia variable con la frecuencia en los puertos de Rx.....	72
Figura 5-16: Ruteo sección de RF transceiver AD9364	73
Figura 5-17: Campos eléctricos y magnéticos en una CPWG.....	73
Figura 5-18: Diagrama de tiempos de señales interface digital transceiver-FPGA.....	75
Figura 5-19: Estimación de consumo y temperatura FPGA	77
Figura 5-20: Estimación de la corriente para cada tensión de la FPGA	77
Figura 5-21: Menú programa BuckDesigner 5054	78
Figura 5-22: Diagrama de conexiones del ADP5054.	79
Figura 5-23: Programa Saturn PCB Design calculo máxima corriente por vía.	79
Figura 5-24: Calculo de impedancia diferencial	80
Figura 5-25: Regla de ruteo impedancia diferencial	80
Figura 5-26: Ruteo de impedancia diferencial	81
Figura 5-27: Conexiones entre USB 3.0-resistencia-FPGA.	81
Figura 5-28: Regla de ruteo match length FPGA-USB 3.0	82
Figura 5-29: Calculo impedancia CPWG	83
Figura 5-30: Esquemático simulación alimentación ADP5054.....	84
Figura 5-31: Esquemático simulación alimentación de power selector y ADP2164.....	84
Figura 5-32: Resultado simulación de alimentación, power selector	85
Figura 5-33: Resultado simulación de alimentación, tensiones de salida	85
Figura 5-34: Circuito importado y reducido	86
Figura 5-35: Esquemático simulación parámetros S.....	87
Figura 5-36: Coeficiente de reflexión en conector SMA	87
Figura 5-37: Insertion Loss y Return Loss del balun TCM1-63AX+	88
Figura 5-38: Diagrama desadaptación de impedancia balun-transceiver	89
Figura 5-39: Resultado simulación coeficiente de reflexion balun-transceiver.....	89
Figura 5-40: Circuito simulación parámetros S, análisis desadaptación balun-transceiver.....	90
Figura 5-41: Resultado simulación, análisis desadaptación balun-transceiver.....	90
Figura 5-42: Insertion y return loss del balun 2450BL07A0050	91

Índice de Tablas

Tabla 1-1: Tabla comparativa entre radios	2
Tabla 2-1: Transceivers disponibles en mercado.	12
Tabla 2-2: Opciones de Booting USB 3.0.....	17
Tabla 2-3: Selección de clock USB 3.0	17
Tabla 2-4: FPGA de SDR comerciales.....	19
Tabla 2-5: Recursos necesarios para receptor QAM.....	19
Tabla 2-6: Recursos necesarios para application processor	20
Tabla 2-7: Estimación de recursos a utilizar	21
Tabla 2-8: Estimación del consumo por etapa	23
Tabla 2-9: Corriente necesaria por tensión.....	24
Tabla 2-10: Asignación de pines GPIO-FPGA.....	25
Tabla 2-11: Selección del modo de booting FPGA	29
Tabla 3-1: Cantidad de señales por sección	42
Tabla 3-2: Impedancias de cada sección	43
Tabla 3-3: Longitud de líneas de datos, memoria DDR3	48
Tabla 5-1: Layout design guide para USB 3.0 controller	57
Tabla 5-2: Layout design guide para FPGA.....	59
Tabla 5-3: Micron design guide para DDR3 memory	60
Tabla 5-4: Xilinx design guide para DDR3 memory	61
Tabla 5-5: Largo ruteo señales DDR3	61
Tabla 5-6: Layout design guide para Transceiver AD9364	68
Tabla 5-7: Análisis distancia transceiver-balun en sección de RF.	74
Tabla 5-8: Restricción de tiempos interface digital transceiver-FPGA.....	75
Tabla 5-9: Ajuste largo señales digitales AD9364	76
Tabla 5-10: Largo de líneas interface FPGA-USB3.0.....	83
Tabla 5-11: Relación entre return loss y potencia reflejada, transmitida.....	88
Tabla 5-12: Información hardware de cada sección	92
Tabla 5-13: Información conexión integrados principales.....	93

Lista de Acrónimos

ADC	Analog to Digital Converter
AMBA	Advanced Microcontroller Bus Architecture
ASIC	Application Specific Integrated Circuit
API	Application Programming Interface
AXI	Advanced eXtensible Interface
BB	Base Band
BBA	Base Band Amplifier
BBP	Base Band Processor
BGA	Ball Gate Array
BOM	Bill of Materials
CPU	Central Processing Unit.
CAD	Computer Assisted Design
DAC	Digital to Analog Converter
DDC	Digital Down Converter
DDR	Double Data Rate
DDS	Digital Direct Synthesis
DMA	Direct Memory Access
DUC	Digital Up Converter
DSP	Digital Signal Processor
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
ENACOM	Ente Nacional de Comunicaciones
FAQ	Frequently Asked Questions
FDD	Frequency Division Duplexing
FIFO	First In First Out
FPGA	Field Programmable Gate Array
HDL	Hardware Description Language
GPIO	General Purpose Input Output
GPP	General Purpose Processor

IC	Integrated Circuit
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ITU	International Telecommunication Union
JTAG	Joint Test Action Group
LPF	Low Pass Filter
LAPAC	Laboratorio de Procesamiento de Señales Aplicadas y Computación de Alto Rendimiento
MIMO	Multiple Input Multiple Output
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
PCB	Printed Circuit Board
RF	Radio Frequency
RFFE	Radio Frequency Front End
ROM	Read Only Memory
SDR	Software Defined Radio
SPI	Serial Peripheral Interface
SRRC	Square Raised Root Cosine
USB	Universal Serial Bus
VCO	Voltage Controlled Oscillator
XPE	Xilinx Power Estimator

Resumen

Esta tesis describe el diseño del hardware para una Radio Definida por Software (SDR). Partiendo de una arquitectura modular genérica, pasando a una arquitectura con componentes definidos, hasta el desarrollo del PCB de la misma.

Esta SDR cubre un rango de frecuencia de 70 MHz hasta 6 GHz, tiene una conexión USB 3.0 como interface externa y una FPGA Artix-7 como unidad de control y procesamiento. Dicha FPGA puede ser programable por USB; esta característica permite realizar experimentos en un rango de las siguientes señales: FM, TV broadcast, celular, Wi-Fi entre otros. El Front End de RF está compuesto por el transceiver AD9364 de Analog Devices el cual tiene 56 MHz de ancho de banda instantáneo. Este dispositivo puede ser alimentado por USB o por medio de un conector tipo Jack.

Esta placa puede utilizarse en los laboratorios de todos los cursos de comunicaciones de la carrera, además de los cursos de procesamiento de señales aleatorias y determinísticas. Solo requiere un par de antenas y contar con una computadora donde se programa el tipo de procesamiento que se desea hacer con los datos, utilizando software abierto (GNU Radio). Este tipo de equipos está presente en todas las carreras de Telecomunicaciones de las Universidades más prestigiosas del mundo, debido a la facilidad con que permiten realizar experimentos complejos y entender, rápidamente, el estado del arte.

Capítulo 1

1. Introducción

1.1 ¿Que es una radio definida por software?

El termino radio definida por software fue utilizado por Josep Mitola en 1991 en referencia a las radios reprogramables o reconfigurables [1]. En otras palabras, un mismo hardware puede realizar diferentes funciones en momentos diferentes. El foro de SDR las define como una radio en la cual se puede programar el tráfico y control de la información, soportando un amplio rango de frecuencias y aplicaciones de software. El usuario puede cambiar de un formato de comunicación a otro en cuestión de milisegundos, usar el GPS para localización o recibir una transmisión satelital.

1.2 ¿Por qué utilizar radios definidas por software?

En el mundo de las comunicaciones inalámbricas, los estándares y protocolos avanzan a una velocidad tal que los equipos de comunicaciones quedan obsoletos poco después de su producción. Para remediar esto, las SDR representan un cambio en el paradigma comparado con las radios tradicionales, en donde gran parte de su funcionalidad es implementada mediante software en lugar de hardware. Este cambio, reduce la cantidad de componentes analógicos y de radio frecuencia (RF), haciendo énfasis en el procesamiento de señales y la programación, logrando una gran versatilidad en el receptor.

1.3 Aplicaciones y características de las SDR

Interoperabilidad: Una SDR puede operar como puente entre múltiples sistemas de radios incompatibles. Interoperabilidad es una de las principales razones por las cuales los militares estaban interesados en ellas. Diferentes ramas de los militares y los policías usan decenas de radios incompatibles. Durante comunicaciones en operaciones conjuntas una SDR multicanal puede actuar como intérprete de las diferentes radios. Un proyecto militar de los Estados Unidos que aplica esta característica es el SpeakEasy [2]. Este utiliza una SDR para realizar comunicaciones entre 10 diferentes tipos de radio militares en un solo sistema.

Eficiencia en el uso de recursos ante condiciones variables: Una SDR puede adaptar la forma de onda para maximizar algún parámetro clave. Por ejemplo, una señal de baja potencia o una modulación más lenta puede ser seleccionada si la radio esta baja de batería. Una señal de alta tasa puede ser seleccionada si se requiere bajar un archivo rápido. Eligiendo la forma de onda más apropiada en cada escenario, las radios pueden proveer una mejor experiencia al usuario (por ejemplo, mayor durabilidad de la batería). Siempre y cuando haya una negociación posible entre las radios de la red.

Uso conveniente de las frecuencias (Radio Cognitiva): Una SDR puede sacar ventaja del espectro de frecuencia que no está siendo utilizado. Si el dueño de la porción de espectro no está utilizando la misma, una SDR puede pedir prestado hasta que el dueño vuelva. Esta técnica tiene un gran potencial para incrementar la cantidad de espectro disponible. También se puede

cambiar la modulación para aprovechar más el ancho de banda o ser más inmune a determinado tipo de interferencias detectadas en el ambiente.

Aumento de tiempo de vida útil: Una SDR puede actualizarse en el campo para soportar los últimos estándares de comunicaciones. Esta capacidad es de especial importancia para el ciclo de vida de los radios en aplicaciones militares, comunicaciones o aeroespaciales. Por ejemplo, un nuevo estándar de celular que sale al mercado puede ser cargado remotamente mediante un nuevo software en la estación base (SDR), ahorrando costos de un nuevo hardware y trabajo de instalación.

Bajo costo: Una SDR puede adaptarse para usarse en diferentes mercados y múltiples aplicaciones. Algunos radios pueden ser vendidos a compañías de celulares o automóviles, pudiendo reducir los costos de mantenimiento y entrenamiento.

Investigación y desarrollo: Las SDR puede ser utilizadas para implementar diferentes formas de ondas en tiempo real para análisis de performance.

1.4 Comparativa entre Radios Definidas por Software y Radio Definidas por Hardware.

A continuación se muestra una tabla específica de ventajas (sombreado gris) y desventajas entre los dos tipos de radio.

Es importante aclarar que esta comparativa no es válida para todos los casos de uso de los radios.

Radio definida por software	Radio definida por hardware
Mayor tiempo de desarrollo	Menor tiempo de desarrollo
Adaptabilidad a diferentes escenarios	Se debe utilizar para un escenario específico
Gran variedad de modulaciones	Modulaciones depende del HW adquirido
Simulaciones en PC	Necesidad de laboratorio y equipamiento para simulaciones
Adaptable a nuevas tecnologías	No adaptable a nuevas tecnologías
Mayor costo económico al principio	Menor costo al principio
Menor Sensibilidad en frecuencias específicas	Mayor sensibilidad en frecuencias específicos
El consumo es menor ya que se adapta a momentos y formas de funcionamiento.	Sólo tiene dos modos de consumo On y Stand By
Reprogramable	Única funcionalidad desde que se graba el firmware

Tabla 1-1: Tabla comparativa entre radios

1.5 Objetivos de la tesis

La finalidad de esta tesis, es el diseño de una Radio Definida por Software. Esta representa las primeras etapas de un proyecto que también contempla: construcción, puesta en marcha, software, etc. de la SDR. La siguiente figura muestra las diferentes etapas del proyecto completo:

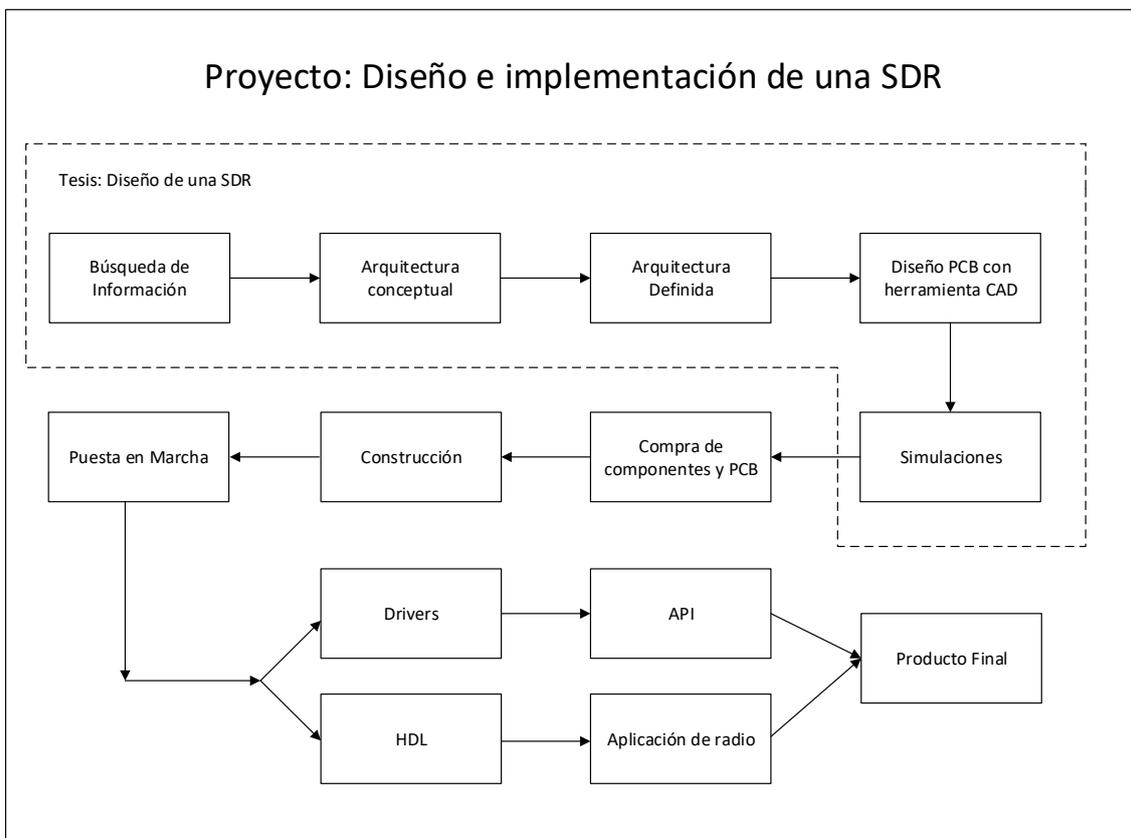


Figura 1-1: Etapas del proyecto

Este proyecto tiene los siguientes requerimientos:

- Poder escuchar las radios comerciales de FM mediante el hardware a desarrollar y una computadora utilizando el programa open source GNU-RADIO.

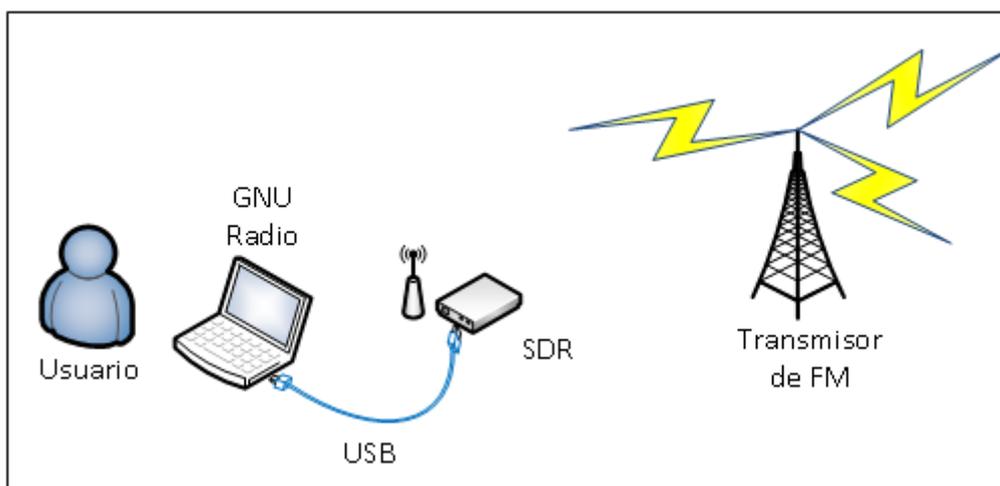


Figura 1-2: Esquema de funcionamiento receptor FM

- Establecer comunicaciones digitales punto a punto mediante la SDR a desarrollar y cualquier otra SDR, por medio de diferentes tipos de modulaciones establecidas a través de GNU-RADIO.

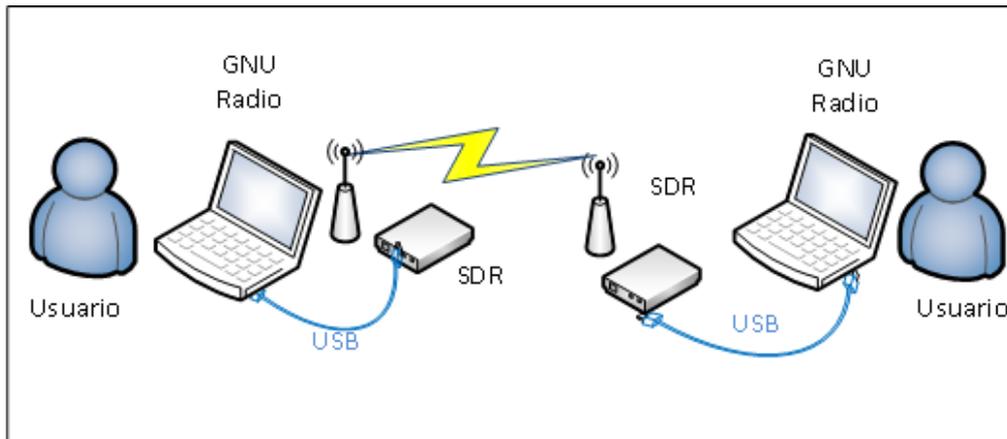


Figura 1-3: Esquema de funcionamiento comunicación punto a punto

- Conexión USB 3.0
- Frecuencia de operación de 100 MHz hasta 3 GHz
- Ancho de banda de 40 MHz
- Memoria DDR3

Por lo tanto el requerimiento de esta tesis es diseñar una SDR la cual tenga las características enunciadas anteriormente.

Las etapas restantes quedan como trabajo a futuro.

1.6 Metodología de diseño

Para realizar este proyecto se utilizó una metodología de diseño Top-Down. La cual consiste en capturar una idea con un alto nivel de abstracción, implementarla partiendo de la misma, e incrementar el nivel de detalle según sea necesario. El sistema inicial se va subdividiendo en módulos, estableciendo una jerarquía. Cada módulo se subdivide hasta llegar a los componentes primarios del diseño.

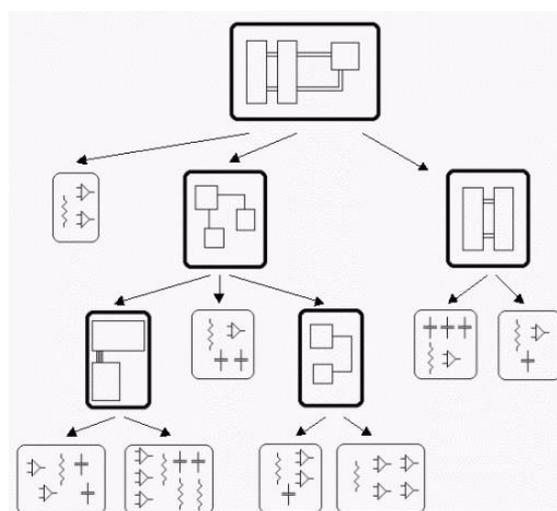


Figura 1-4: Diagrama metodología de diseño Top-Down

Utilizando la idea de este método se desarrolló el diseño de la SDR dividiendo al mismo en las siguientes etapas:

- Diseño Modular según funciones
- Diseño Modular específico
- Selección de Componentes
- Diseño del esquemático
- Diseño del PCB
- Simulaciones

Capítulo 2

2. Diseño

2.1 Arquitectura general según funciones

La arquitectura de la SDR debe soportar la evolución a nuevas plataformas de servicios, softwares y hardware.

La arquitectura de las SDR debe tener las siguientes propiedades:

- Permitir que el funcionamiento del sistema sea definido por software, esto significa, que una porción del sistema se implementara mediante programación y/o reconfiguración del hardware. Permitiendo que el hardware del sistema pueda reutilizarse para distintas aplicaciones sin la necesidad de modificaciones físicas del mismo.
- Tener la capacidad de captar y transmitir las señales de RF en el rango de operación de las mismas. Estas señales son transmitidas/recibidas en una frecuencia intermedia (por cuestiones de tamaño de antena, potencia etc.). Por lo tanto la arquitectura debe permitir bajar/subir esta frecuencia a una de operación/transmisión.
- Poder digitalizar las señales recibidas para su posterior procesamiento y almacenado.

La figura 2-1 muestra una arquitectura en donde todos sus bloques son lógicos. En las arquitecturas lógicas se da todo el detalle posible sin especificar como es implementada la misma. En cambio en las arquitecturas físicas se detalla cómo esta implementada la misma, componentes, software etc.

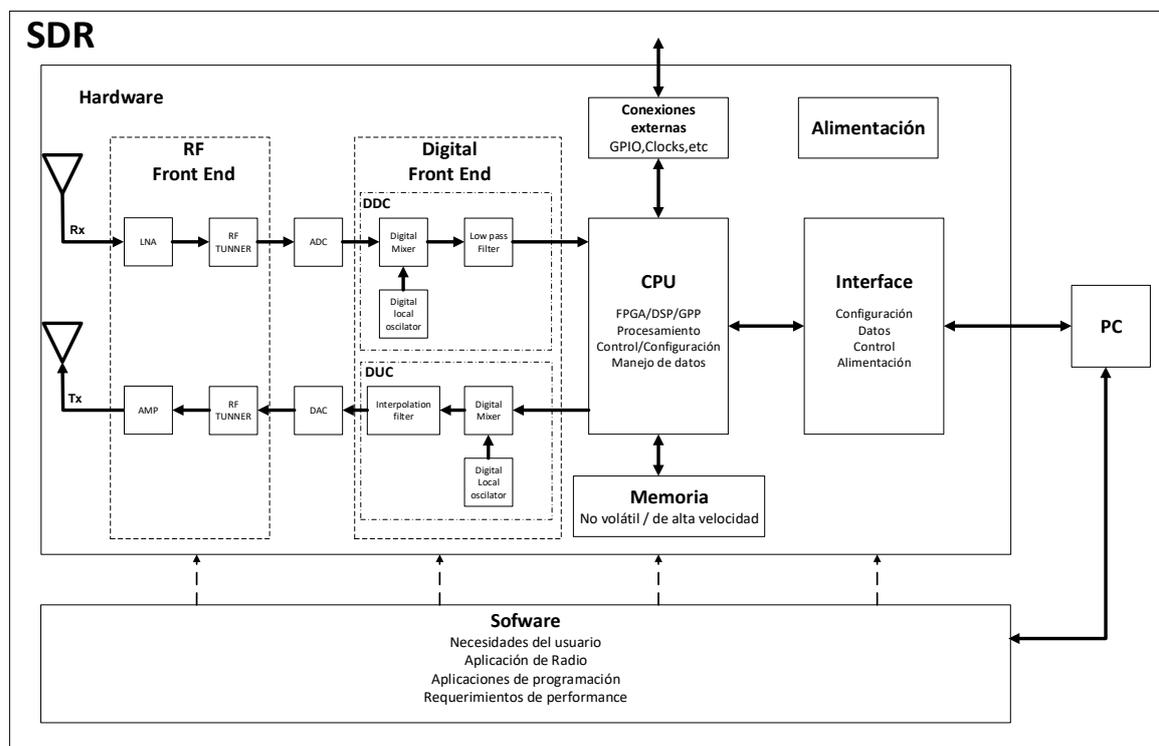


Figura 2-1: Diagrama en bloques de la arquitectura general de la SDR

2.1.1 Antenas

Una antena transmisora transforma energía eléctrica en ondas electromagnéticas, una receptora realiza la función inversa. Para las SDR que son diseñadas para múltiples modos y/o una banda amplia de frecuencia la selección de la antena es algo crucial. En la mayoría de los casos para un rango amplio de frecuencia o múltiples modos, es necesario utilizar más de una antena para cubrir estos rangos/modos.

Las características fundamentales de una antena son su ganancia y el ancho del lóbulo al cual su potencia cae a la mitad (-3 dB). La ganancia es una medida de cuanto de la potencia de entrada es radiada en una dirección particular. La siguiente figura muestra un ejemplo de patrón de radiación de una antena en función del ángulo.

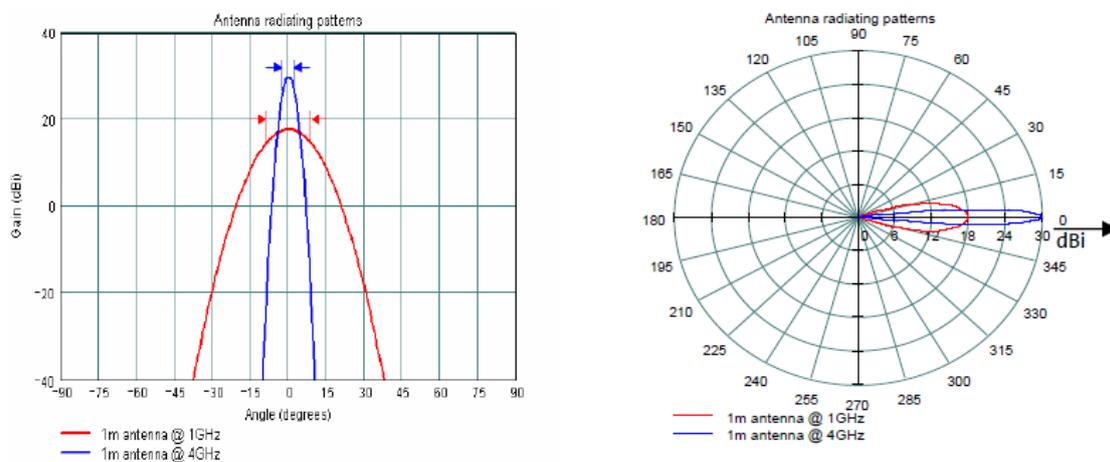


Figura 2-2: Ejemplo patrón de radiación de una antena

Algunas de las antenas que pueden ser utilizadas en una SDR las siguientes: mini whip antenna, monopole antenna, telescopic antenna, omnidirectional antenna, adaptative array smart antenna, etc.

A menudo las antenas son denominadas inteligentes, debido a su capacidad de seleccionar una banda de frecuencia, seguimiento móvil o cancelación de interferencia.

Las antenas isotrópicas conceptualmente radian de igual modo en todas las direcciones.

2.1.2 RF Front-End

Su principal función es transmitir y recibir señales en varias frecuencias de operación. Otras de sus funciones dependiendo el sentido de la señal son las siguientes:

- En modo Tx: La señal analógica es llevada a una frecuencia intermedia (IF) por medio de un mixer y oscilador local (LO). Esta es amplificada para luego ser transmitida.
- En modo Rx: En el camino de recepción la señal de RF es capturada. Luego la señal pasa a través de un amplificador de bajo ruido (LNA) el cual se encuentra lo más cercano posible a la antena, para amplificar señales débiles y minimizar el nivel de ruido. Esta

señal amplificada es llevada a una frecuencia intermedia (IF) por medio de un mixer y un oscilador local (LO).

Las antenas son conectadas con el Front End de RF utilizando circuitos de adaptación para obtener una transferencia óptima de potencia.

2.1.3 DAC y ADC.

El Conversor Analógico-Digital (ADC) en el camino de recepción y el Conversor Digital-Analógico (DAC) en el camino de transmisión forman un puente entre el Front End Digital y el Front End de RF.

La performance de un ADC puede ser descripta por varios parámetros, por ejemplo alguno de ellos:

- Signal-to-Noise Ratio (SNR).
- Resolución: número de bits por muestra.
- Spurious Free Dynamic Range (SFDR).
- Disipación de potencia.

La performance de un DAC puede ser descripta por varios parámetros, por ejemplo alguno de ellos:

- Resolution
- Full scale range (FSR)
- Offset error
- Gain error
- Differential Nonlinearity
- SNR

2.1.4 Digital Front-End

El Digital Front-End se lleva a cabo las funciones de Digital Down Converter (DDC) y Digital Up Converter (DUC).

Un DDC convencional está compuesto por tres secciones:

- Un mixer digital
- Un oscilador local digital
- Un filtro pasa bajos

Mediante el mixer digital y el oscilador local se traslada las muestras digitales en IF a BB. El filtro pasa bajo limita el ancho de banda de la señal y actúa como un diezmodador. Los DDC incluyen una gran cantidad de hardware para realizar dicho trabajo, como por ejemplo: multiplicadores, sumadores y shift registers.

El proceso de diezmodado consiste en quedarse con una muestra de cada N muestras de la señal, como muestra la figura 2-3. Si la tasa de muestras diezmodadas se mantiene mayor al doble del ancho de banda de salida no se perderá información (Nyquist).

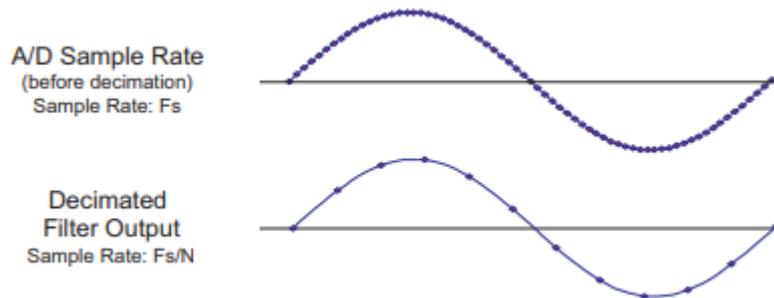


Figura 2-3: Proceso de diezmo

Un DUC convencional está compuesto por tres secciones:

- Un mixer digital
- Un Oscilador local digital
- Un filtro de interpolación

Mediante el mixer digital y el oscilador local se traslada la señal de BB a una IF. Esta IF es determinada por el oscilador local. Por lo general la frecuencia de muestreo (F_s/N) de la señal proveniente del BBP es menor a la frecuencia (F_s) que necesita el DAC. Para compensar este problema se utiliza un filtro de Interpolación mediante el cual se incrementa la frecuencia de muestreo de la señal en banda base en un factor N . La figura 2-4 muestra el efecto del filtro de interpolación.

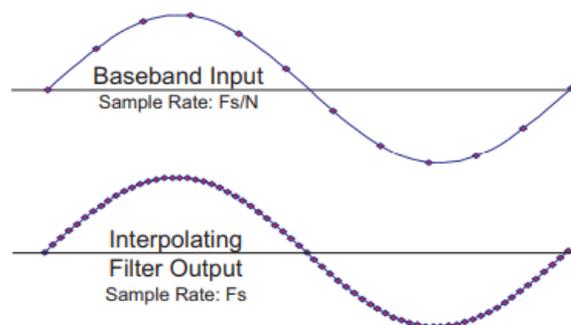


Figura 2-4: Proceso de interpolación

2.1.5 CPU

Sus principales funciones son: control, configuración, manejo de datos e interconexión entre los diferentes módulos (memoria, gpio, external interface, digital front-end).

Además también se puede realizar procesamientos, algoritmos, encriptación/des encriptación etc.

Entre los posibles CPU a utilizar en un SDR se encuentran las siguientes opciones:

ASIC: Es un circuito integrado hecho a la medida para un uso en particular, en vez de ser concebido para propósitos de uso general. Son utilizados cuando se necesita una alta tasa de datos a un consumo de energía razonable.

FPGA: Son integrados capaces de ser reprogramados al contener una matriz de bloques lógicos reprogramables. Pueden soportar altas tasas y altos niveles de consumo de energía.

GPP: Son procesadores de propósito general los cuales pueden procesar tasas bajas/medias de señales en tiempo real. Estos son ideales cuando el consumo de energía no es de gran importancia.

DSP: Un procesador digital de señales, es un sistema basado en un procesador o microprocesador que posee un conjunto de instrucciones, un hardware y un software optimizados para aplicaciones que requieran operaciones numéricas a muy alta velocidad. Por lo general no ofrecen suficiente tasa o bajo consumo como las demás opciones. Son utilizados cuando los GPP no son lo suficientemente rápidos, el consumo es demasiado o los desarrolladores no tienen experiencia en FPGA.

En la siguiente figura se muestra una comparativa en cuanto: tasa de datos, consumo, esfuerzo de desarrollo y costo entre las diferentes soluciones para la CPU:

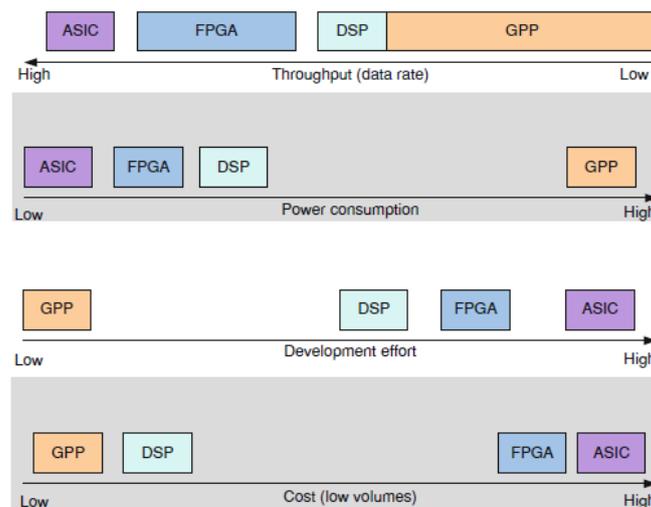


Figura 2-5: Comparativa entre las posibles CPUs

2.1.6 Memoria

La memoria del sistema puede estar compuesta por memorias de alta velocidad y/o memorias no volátiles. Las mismas proveerán recursos de cómputo y capacidad de almacenamiento de datos para el sistema.

2.1.7 Conexiones externas

Este módulo contiene las conexiones físicas de la SDR con elementos externos, como por ejemplo: GPIO, alimentación, Clock externo, etc.

2.1.8 Interfaces

Es el bloque que encarga de las interconexiones de la SDR con el resto de sistema, para las líneas de datos, configuración, programación y control.

2.1.9 Alimentación

Su función es proveer la alimentación a los módulos nombrados anteriormente. En el mismo se realizaran las diferentes conversiones de DC a DC que sean necesarias.

2.2 Arquitectura definida

En base a las funciones expuestas en la sección anterior, los requerimientos y los componentes disponibles en el mercado, diseñe la siguiente arquitectura para la implementación del hardware de la SDR.

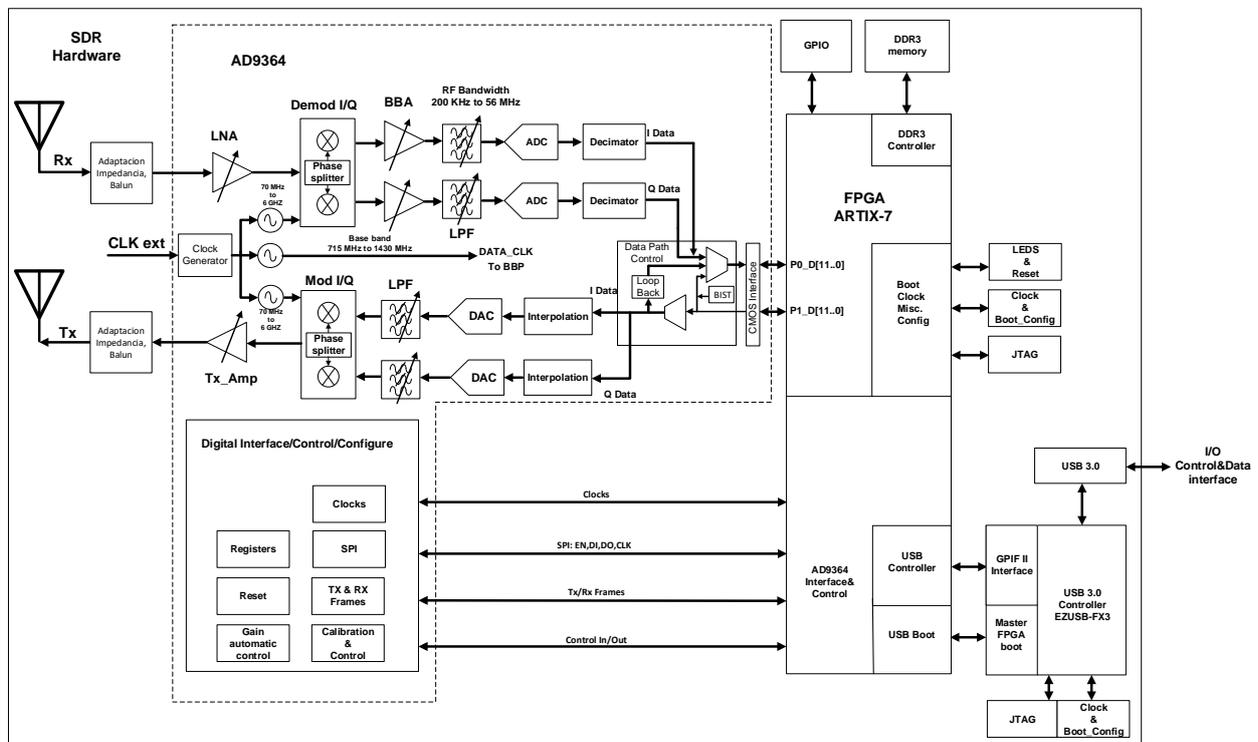


Figura 2-6: Diagrama en bloques de la Arquitectura definida del hardware de la SDR

A continuación se detalla la información sobre cada módulo de esta arquitectura.

2.2.1 RF Front End & Digital Front End

Opte en utilizar un transceiver integrando ambos Front End en un solo IC, lo que significa una menor cantidad de componentes y superficie. Este fue el primer componente seleccionado, ya que el mismo determina las principales características de la SDR (ancho de banda, rango de frecuencia, etc.). Además el mismo fija requerimientos para las demás etapas del sistema (alimentación a utilizar, tasa de datos necesaria, etc.).

En base a los requerimientos estipulados los posibles transceiver encontrados en el mercado fueron los siguientes:

Integrado	fabricante	Ancho de banda	Rango de Frecuencia	Costo(\$USD)
AD9361	Analog Devices	56 MHz	70 MHz-6GHz	214.31
AD9364	Analog Devices	56 MHz	70 MHz-6GHz	159.20
LMS6002DFN	Lime MicroSystems	28MHz	0.3-3.8GHz	35.00

Tabla 2-1: Transceivers disponibles en mercado.

Descarte el transceiver LMS6002 por los siguientes motivos:

- No cumple con el ancho de banda (requerimiento que podría ser flexible debido a su bajo precio).
- Ya existe una SDR open source que utiliza este transceiver (proporcionan: gerbers, esquemáticos y proyecto entero en Altium Designer).
- Escases de información en cuanto a funcionamiento y guías de diseño.

Decidí utilizar el AD9364 y dejar al AD9361 para una posible mejora a futuro convirtiendo a la SDR en una MIMO. En particular ya existen SDRs open source con este transceiver (empresa Ettus) no comparte información de gerbers o PCB (brinda información sobre esquemático, HDL y drivers [31]).

Este dispositivo combina un Front End de RF con un flexible mezclador de señales en banda base y un sintetizador de frecuencias integrado. Simplificando el diseño a una interface digital de configuración por medio de un procesador.

Por medio del bus SPI se tiene todo el control de toda la parte digital del AD9364. Cada registro SPI es de 8 bit de ancho y contienen: bits de control, monitores de estado y otras configuraciones que controla todas las funciones del dispositivo (filtrado, ganancia, etc.). En la siguiente figura exponemos que porción de la arquitectura de la SDR será cubierta por este IC:

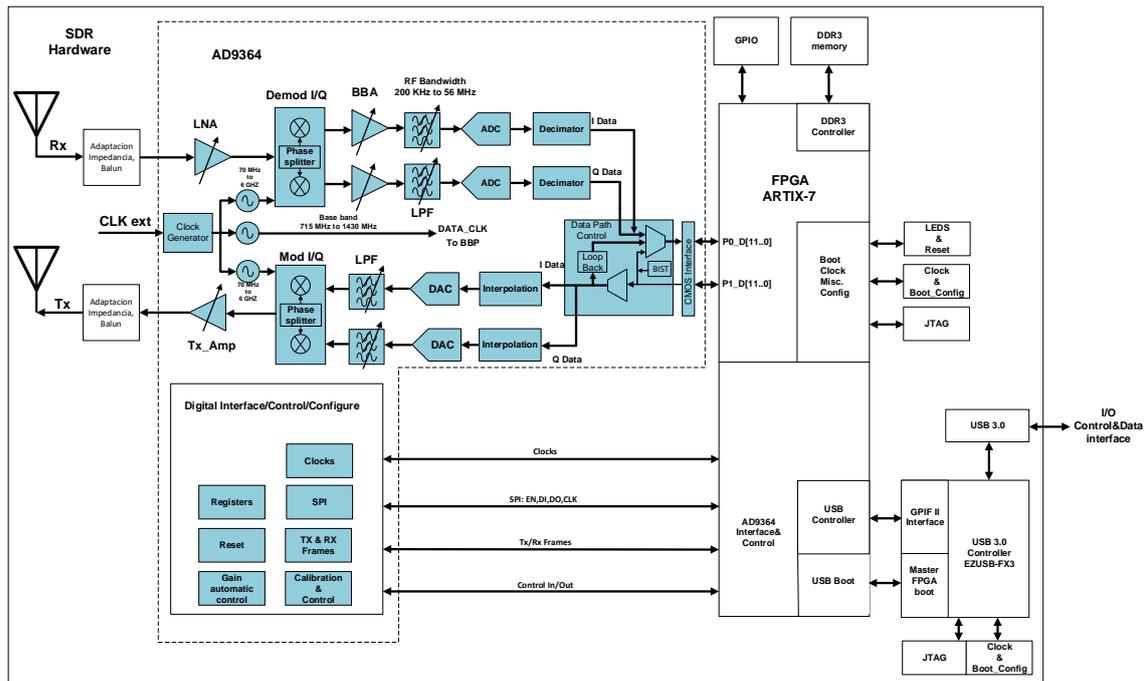


Figura 2-7: Diagrama de arquitectura definida, sección transceiver

Este conjunto de módulos tendrá las siguientes funciones:

- Convertir las señales de RF a BB para la recepción
- Convertir las señales BB a RF para la transmisión
- Acondicionamiento de las señales

A continuación se explicará la función y características de cada uno de los módulos que componen al transceiver:

- **Analog to Digital conversión (ADC):** Conversión al dominio digital de las señales en banda base entregadas por todo el camino de recepción. El mismo es de 12 bits.
- **Digital to Analog conversión (DAC):** Conversión al dominio analógico de las señales en banda base a ser entregadas al camino de transmisión. El mismo es de 12 bits.
- **Demod I/Q:** Convierte la señal de RF que entrega la cadena de recepción del RFFE a banda base para su posterior digitalización y procesamiento.
- **Mod I/Q:** Convierte la señal en banda base a transmitir a RF para ser luego amplificadas por el RFFE en su cadena de transmisión.
- **Diezmado:** El proceso de diezmado consiste en quedarse con una de cada n muestras, siempre dentro de los límites de Nyquist. Este límite es determinado por el ancho de banda de los filtros pasa bajo. Este proceso es útil ya que baja la tasa de datos hacia procesador y demanda menos almacenamiento.
- **Interpolación:** El proceso de interpolación consiste en aumentar la tasa de muestreo en n . Este proceso no cambia la frecuencia de la señal solo su tasa de muestreo.
- **Low noise amplifier (LNA):** Los amplificadores de bajo ruido amplifican señales de bajo poder sin degradar su relación señal a ruido. Este es un componente clave en el Front-

End de RF para reducir el ruido, ya que la figura de ruido es dominada por las primeras etapas del receptor.

- **Low Pass Filter (LPF):** Los filtros pasa bajo dejan pasar las señales con una frecuencia menor a la frecuencia corte y atenúa las señales mayores a la misma. Algunos los filtros pasa bajos que componen esta etapa:

En Rx:

- Un filtro de tercer orden Butterworth, el cual tiene una frecuencia de corte programable en el rango de 200 kHz a 39.2 MHz.
- Un filtro con un polo simple, el cual tienen una frecuencia de corte programable en el rango de 1 MHz a 70MHz

En Tx:

- Un filtro de tercer orden Butterworth, la frecuencia de corte es programable en el rango de 625 kHz a 32 MHz.
- Un filtro con un polo simple, la frecuencia de corte es programable en el rango de 2.7 MHz a 100MHz

- **Generador de señales BITS:** Este integrado dispone de un generador de señales interno con el cual se puede inyectar señales tanto en el puerto de salida de datos de Tx como en el de entrada de Rx. Este es útil como herramienta de debugging a la hora de probar la conectividad de los puertos de Tx y Rx.
- **Digital Interface:** Por medio este módulo se realiza la interface con el BBP, pudiendo configurar completamente el transceiver. Cada uno de los módulos nombrados anteriormente (ADC, filtros, etc.) esta mapeado a una dirección memoria (registros), los cuales se van modificando por comandos a través de SPI. Mediante estas modificaciones se puede configurar entre otras cosas:
 - Ganancia de los amplificadores.
 - Frecuencia de corte filtros.
 - Frecuencia de los osciladores locales.
 - Modo de operación.
 - Calibración.
- **Adaptación de impedancia:** Mediante circuitos con componentes discretos y/o distribuidos, se logra una red de adaptación para obtener máxima transferencia de potencia tanto en la transmisión como en la recepción.

Información más detallada del transceiver puede ser encontrada en [3].

2.2.2 USB 3.0

La mayor tasa de datos del sistema está determinada por el transceiver, el cual tiene una tasa máxima de aproximadamente 184 MB/seg (61.44 MHz de clock máximo y 24 líneas de dato). Para este proyecto una conexión USB 2.0 (60 MB/seg idealmente) no es suficiente para operar a la máxima tasa de datos por lo tanto se decidió utilizar una conexión USB 3.0 (300 MB/seg).

2.2.2.1 Información general USB 3.0

Las especificaciones del USB 3.0 permiten una tasa de transferencia teórica máxima de 5 Gbps (velocidad práctica de hasta 300 Megabytes), la cual es 10 veces más que la tasa del USB 2.0 (High Speed). La arquitectura del USB 3.0 contiene tres capas: physical layer, link layer y protocol layer.

Physical Layer

La capa física hace referencia al puerto de conexión y al cable de conexión, mediante el cual se realiza el upstream y downstream. Los cables diferenciales de transmisión y recepción de datos del USB 3.0 esta mallados y separados. Los cables USB 3.0 incluyen a los utilizados en el USB 2.0 como se muestra en la siguiente figura:

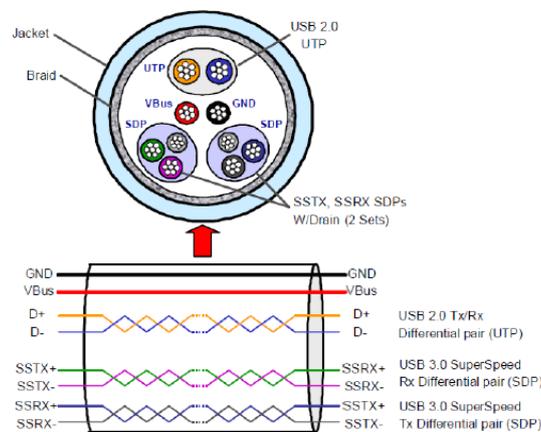


Figura 2-8: Cables USB 3.0

El bus SuperSpeed emplea un enfoque dual y simple, el cual permite transmitir y recibir paquetes simultáneamente. Por ejemplo durante una ráfaga de transacciones, el dispositivo puede recibir datos desde el host y devolver una confirmación asociada con los datos recibidos.

Link Layer

La link layer es la responsable de mantener una comunicación confiable y robusta entre el host y el dispositivo. Este mantenimiento lo realiza utilizando una máquina de estados llamada "Link Training and Status State Machine" (LTSSM).

Protocol Layer

La capa de protocolo maneja las reglas de comunicación entre el host y el dispositivo.

2.2.2.2 Controlador USB 3.0 CYUSB3014

El dispositivo que decidí utilizar como controlador del USB3.0 es el CYUSB3014 de la compañía Cypress. Este es un controlador de periféricos de SuperSpeed que provee características integradas y flexibles.

Este controlador es totalmente configurable, paralelo y posee una interface programable llamada GPIF II, mediante la cual se puede conectar a cualquier tipo de procesador, ASIC o FPGA.

A continuación se mostrara una vista general de este dispositivo:

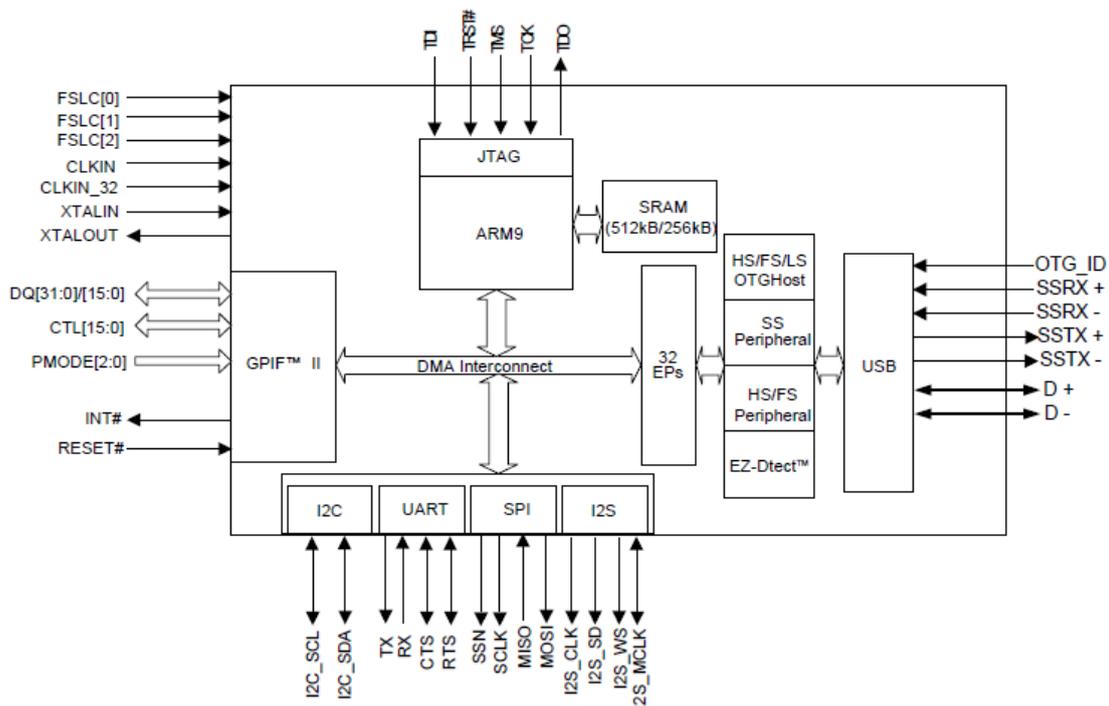


Figura 2-9: Diagrama en bloques controlador USB 3.0

CPU

El dispositivo cuenta con un CPU de 32 bits, un ARM92EJ-S de 200 MHz. Este core tiene acceso directo a una memoria de instrucciones de 16 KB y una de 8 KB para datos. Además tiene dos memorias cache (una para instrucciones y otra para datos) de 8KB cada una.

DMA

El dispositivo habilita eficientes y flexibles transferencias del DMA entre varios periféricos (USB, GPIF II, SPI, I2S y UART).

JTAG Interface

Es una interface estándar de 5 pines para conectar el JTAG con el debug firmware a través del CPU. Cualquier herramienta estándar de debugging para ARM926EJ-S puede ser utilizada para este dispositivo.

Boot Options

El dispositivo tiene integrado una ROM de 32 KB, la cual contiene el bootloader, permitiendo que se baje la imagen desde diferentes fuentes. El modo de boot se selecciona mediante los pines PMODE, la siguiente tabla muestra las diferentes configuraciones de boot.

PMODE[2:0]			Boot Option
PMODE[2]	PMODE[1]	PMODE[0]	
Z	0	0	Sync ADMUX (16-bit)
Z	0	1	Async ADMUX (16-bit)
Z	0	Z	Async SRAM (16-bit)
Z	1	1	USB Boot
1	Z	Z	I2C
Z	1	Z	I2C; on failure, USB Boot is enabled
0	Z	1	SPI; on failure, USB Boot is enabled
0	0	0	S0-port (eMMC); On Failure, USB Boot is enabled

Tabla 2-2: Opciones de Booting USB 3.0

Z = Pin is floating; left unconnected.

En este caso se decidió que el boot sea por medio de una memoria EEPROM y en caso de fallo por medio del USB (PMODE [2:0] = 000).

CLOCKING

Este dispositivo permite conectar un cristal entre los pines XTALIN y XTALOUT o conectar un clock externo en pin CLKIN. Estos pines pueden dejarse sin conectar de no ser usados. La frecuencia de cristal soportada es de 19.2 MHz.

Mediante los pines FSLC [2:0] se determina que opción fue seleccionada: cristal o clock externo. La siguiente tabla muestra las diferentes opciones de cristal o clock externo:

FSLC[2]	FSLC[1]	FSLC[0]	Crystal/Clock Frequency
0	0	0	19.2-MHz Crystal
1	0	0	19.2-MHz Input CLK
1	0	1	26-MHz Input CLK
1	1	0	38.4-MHz Input CLK
1	1	1	52-MHz input CLK

Tabla 2-3: Selección de clock USB 3.0

Como fuente de clock opté por la opción de utilizar el cristal de 19.2 MHz (FSLC[2:0] = 000).

GPIF II

La interface GPIF II es una máquina de estado programable la cual permite una interface flexible con la CPU, esta puede funcionar como master o slave.

GPIF II tiene las siguientes características:

- Funciona como master o slave.
- Ofrece 256 estados de firmware programables.
- Soporta 8-bit, 16-bit, and 32-bit de bus de datos paralelo
- Frecuencia de interface hasta 100 MHz
- Soporta 14 pines de control configurables cuando se utiliza un bus de datos de 32-bits; todos los pines de control pueden ser entrada, salida o bidireccionales
- Soporta 16 pines de control configurables cuando se utiliza un bus de datos de 16 o 8 bits; todos los pines de control pueden ser entrada, salida o bidireccionales

Una de las implementaciones más populares de GPIF II es la interface sincrónica: Slave FIFO. Esta interface es utilizada en aplicaciones en donde el dispositivo externo que está conectado a este controlador lee o escribí datos desde el.

Información más detallada sobre este controlador puede ser encontrada en [4].

2.2.3 CPU

Entre las opciones mencionadas en la sección 2.1.5, se decidió utilizar una FPGA como CPU por las siguientes razones:

- Gran tasa de datos,
- Gran ancho de banda
- Flexibilidad.
- Paralelismo.
- Reconfigurable

2.2.3.1 Selección de FPGA

Primero se seleccionó que fabricante utilizar, en el mercado de las FPGAs existen 2 grandes empresas Xilinx y Altera. Se decidió utilizar Xilinx debido a que posee la mayoría del mercado de las FPGA.

Una vez seleccionado el fabricante, se decidió utilizar la serie 7 de Xilinx ya que es la más actual y utilizan Vivado como entorno de programación. Esta serie tiene las siguientes gamas:

- Spartan-7
- Artix-7
- Kintex-7
- Virtex-7

Se decidió utilizar la Artix-7 ya que su costo era mucho menor que las de gama alta (Kintex-7 y Virtex-7). La Spartan-7 se descartó debido a que la Artix-7 poseía mayor número de DSP slices a un precio similar. Para ver las diferentes características de estas FPGAs ver [6]. Luego para

seleccionar el modelo adecuado de FPGA Artix-7 se tuvo en cuenta las siguientes características:

Recursos FPGA: Para determinar los recursos necesarios de la FPGA se realizaron estimaciones (sobredimensionando la misma), tomando en cuenta los siguientes parámetros:

- Se realizó un estudio de las capacidades de las SDR comerciales:

Modelo	FPGA	Programmable Logic Gates
USRP B200mini [7]	Xilinx Spartan-6 XC6SLX75	75k
LimeSDR [8]	Altera Cyclone IV EP4CE40F23	40k
bladeRF xA4 [9]	Altera Cyclone V	49K

Tabla 2-4: FPGA de SDR comerciales

- La cantidad de recursos utilizados por la implementación de un receptor QAM como el mostrado en la siguiente figura:

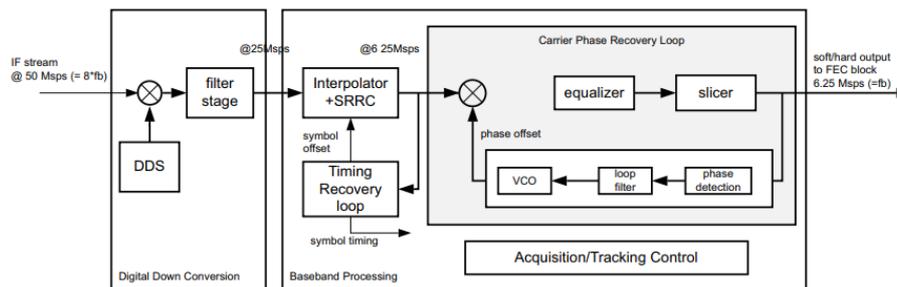


Figura 2-10: Diagrama en bloques receptor QAM

Los recursos necesarios para esta implementación son los siguientes:

Recursos utilizados	
SLICE	304
LUT	987
FF	322
DSP	5
BRAM	2
SRL	86

Tabla 2-5: Recursos necesarios para receptor QAM

Para más detalle sobre esta implementación y especificaciones del receptor ver la referencia [10].

- La cantidad de recursos necesarios para implementar un controlador MicroBlaze application processor [11]. Los recursos necesarios para implementar este procesador son los siguientes:

ModeloFPGA	XC7A200T-3
Logic Cells	7000
% Utilizacion	4%

Tabla 2-6: Recursos necesarios para application processor

Temperatura de operación: Comercial industrial (0° a 85 °C), extended (0° a 100 °C), industrial (-40° a 100 °C) o expanded (-40° a 125 °C).

Cantidad de I/O: la cantidad de pines debe ser suficiente para poder interconectar todos los módulos.

Grado de velocidad: Representa el tiempo que tardan los circuitos lógicos en atravesar el dispositivo, es decir determina la frecuencia máxima que soporta la FPGA. Se seleccionó el grado -1 (gama baja, frecuencia máxima = 464 MHz), ya que a medida que se mejora este grado de velocidad el precio de la FPGA aumenta.

Pitch: El mismo determina la separación entre cada bola del encapsulado BGA, esta puede ser de; 1mm, 0.8mm y 0.5mm. Se decidió utilizar un pitch de 1.mm para tener más espacio entra las vías a la hora de realizar el ruteo del PCB y además es más sencilla de soldar en comparación a las de pitch más chico.

Teniendo en cuenta todas estas características se decidió utilizar el modelo de FPGA XC7A100T-1FTG256C.La siguiente figura muestra el significado de cada letra y numero del modelo seleccionado.

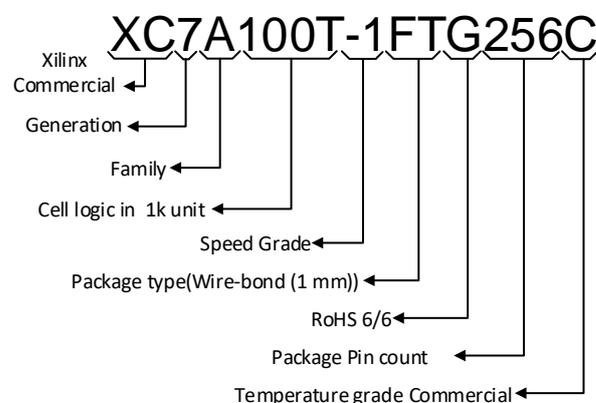


Figura 2-11: Modelo de FPGA seleccionado

Una estimación del porcentaje de ocupación que representan las consideraciones previas (MicroBlaze application processor, modulador y demodulador QPSK) en la FPGA seleccionada es:

FPGA XC7A100T	
Modulo	%Utilizacion
AP MicroBlaze	8%
Mod QPSK	2%
Demod QPSK	2%
Total	12%

Tabla 2-7: Estimación de recursos a utilizar

Se estimó que los recursos utilizados por el transmisor QPSK son similares a los del receptor. Como se puede apreciar en la tabla 2-7, la cantidad de recursos de la FPGA están sobredimensionados, estimando que estos recursos serán suficientes para implementar otros módulos tales como: protocolos, procesamientos, interfaces, controladores, etc.

2.2.3.2 Pin Out y encapsulado

El modelo de FPGA seleccionado está compuesto por un encapsulado Wire-Bond Fine-Pitch Thin BGA de alta densidad con un total de 256 pines, que se encuentran distribuidos en forma de rejilla cuadrada de 16 filas por 16 columnas. El pitch o separación entre los pines es de 1mm. Este tipo de encapsulado es apropiado cuando se dispone de un gran número de I/O, en este caso el modelo dispone de un total de 170. El total de pines de I/O está distribuido en bancos. La figura 2-12 muestra el mapa de pines de I/O de la FPGA. Se pueden distinguir los diferentes bancos por su color y por su numeración.

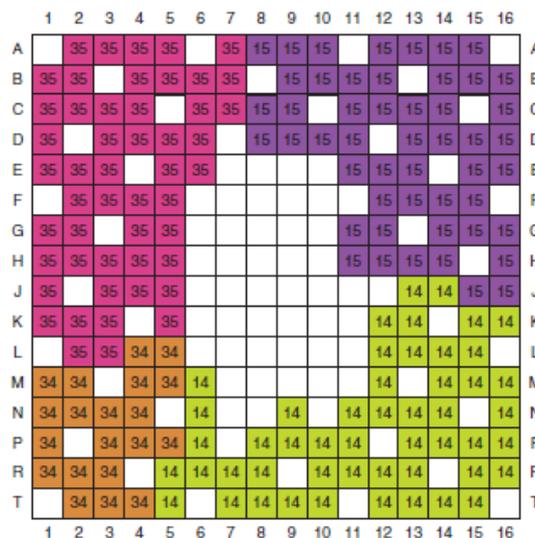


Figura 2-12: Pin Out I/O FPGA

2.2.3.3 Función

Control de aplicación.

Esta tarea se refiere a la implementación de la lógica y máquinas de estados necesarios que definen la o las aplicaciones de la SDR. Definiéndose como la unidad central de control que implementa los modos de operación de la SDR. A través de esta unidad, se brindaran las interfaces lógicas para el control, configuración y monitoreo externo de la SDR.

Procesamiento de señal

Compuesto principalmente por una FPGA con una gran capacidad para el procesamiento digital de señales, memoria rápida y de gran volumen, gran cantidad de pines, interfaces de alta velocidad y capacidad para ser reprogramada.

Estará orientado, como su nombre lo indica, al procesamiento digital que demande la aplicación que quiera embeberse en la SDR. Algunas de estas aplicaciones pueden ser:

- Procesamiento en banda base.
- Manejo de datos.
- Encriptar/Desencriptar.
- Aplicar diferentes tipos de modulación a los datos I/Q.

2.2.3.4 Configuración FPGA

La FPGA seleccionada es configurada cargando las aplicaciones en su memoria interna. En este caso la configuración de esta memoria puede ser cargada por medio de otro procesador (ubicado en el controlador del USB 3.0) de forma serial. Este modo de configuración se lo conoce como "Slave-serial configuration mode".

También se dispone de un JTAG, el cual es una interfaz de 4 pines usada frecuentemente con finalidades de testeo y depuración. La conexión JTAG no sólo sirve para configurar la FPGA sino que es totalmente compatible con el protocolo de testeo de dispositivos definido en el estándar IEEE 1149.1.

Las configuraciones de las FPGA de Xilinx son almacenadas en "CMOS configuration latches" (CCLs). Por lo tanto deben ser reconfigurada después de cada apagado.

2.2.3.5 Alimentación FPGA

Para determinar la alimentación necesaria de la FPGA artix-7 se utilizó la herramienta "Xilinx Power Estimator" [12], de estimación de consumo que provee Xilinx. Otorgando como datos de salida la corriente necesaria en cada banco para su correcto funcionamiento.

También se debe tener en cuenta la secuencia de encendido recomendada:

VCCINT-> VCCBRAM ->VCCAUX ->VCCO

2.2.4 Memoria DDR3

La inclusión de una memoria externa no estuvo en las consideraciones iniciales, se decidió agregarla ya que dota al sistema con la posibilidad de almacenar los datos, ya sean procesados por la FPGA o directamente los datos crudos capturados por el transceiver. El costo de esta inclusión fue de un incremento de en la complejidad del sistema en: una mayor densidad de ruteo de señales en la placa, una ramificación extra de tensión de alimentación y un pequeño coste económico extra.

Se utilizó una de memoria DDR3L con una capacidad total de 256MB .El modelo de la memoria es el MT41J128M16JT-125 fabricado por Micrón. El mismo cuenta con 14 líneas de dirección (A[13..0]), 3 líneas para selección de banco (BA[2..0]), 16 líneas de datos [15..0]. Al utilizar un solo chip de memoria no es necesario utilizar terminaciones (on die terminations). La frecuencia máxima de operación es de 333 MHz.

Para un correcto funcionamiento de la memoria, un controlador de memoria y una interface con la capa física debe ser incluido en la FPGA. El modo más fácil de implementar esto en una FPGA artix-7, es utilizando el generador de cores para una interface de memoria con la herramienta MIG (Memory Interface Generator) Wizard.

Información más detallada sobre esta memoria puede ser encontrada en [5].

2.2.5 Alimentación SDR

La función que se define en este módulo es la de proveer las tensiones secundarias que serán utilizadas por los demás módulos de la SDR.

Dado que el principal elemento de la SDR, el transceiver AD9364, recomienda utilizar convertidores de DC a DC de Analog Devices, se decidió que la mayoría de los integrados de alimentación sean de la misma empresa. Permitiendo así realizar una simulación casi completa de la sección de alimentación (Anexo 5.4).

Para alimentar la mayor parte del sistema se utilizó una de las soluciones que ofrece Analog Devices para la alimentación de FPGAs. Dicha solución utiliza el integrado ADP5054, el cual combina 4 buck regulators en un solo integrado.

Además se estimaron los consumos de los principales integrados, como se indica en la siguiente tabla:

Integrado	Tension	Corriente	Potencia
FPGA	1.0 V	2.919 A	2.919 W
	1.8 V	0.274 A	0.493 W
	1.35 V	0.125 A	0.168 W
Transceiver	1.8 V	0.008 A	0.014 W
	1.3 V	0.55 A	0.715 W
USB 3.0	1.2 V	0.127 A	0.1524 W
	1.8 V	0.065 A	0.117 W
DDR3	1.35 V	0.609 A	0.822 W

Tabla 2-8: Estimación del consumo por etapa

En donde:

- La estimación de consumo de energía de la FPGA se realizó utilizando la herramienta XPE de Xilinx. Para esta estimación se consideraron casos extremos, como el 100% del

uso de los recursos y alta tasa de cambio en las señales (Toggle rate). Para más información ir al [Anexo 5.3](#).

- Para la estimación del transceiver se utilizó el peor caso de consumo provisto por la hoja de datos del mismo. En este caso la transferencia de datos entre el BBP y el transceiver se realizan con un clock de 30.72 MHz (1.8V@ 8mA). La transmisión/ recepción es en modo FDD a 5 Ghz, con un ancho de banda de 5 MHz y 7 dBm de potencia (1.3V@550 mA) [13].
- Para el USB3.0 se utilizó una tabla de consumos típicos que provee Cypress (ver referencia [14]).
- Para obtener el consumo de la memoria DDR3 se utilizó una hoja de cálculo que provee Micrón y se tomaron las corrientes máximas de la misma (ver referencia [15]).

La siguiente tabla indica la corriente necesaria por cada tensión:

Tension	Corriente
1.0 V	2.919 A
1.8 V	0.2885 A
1.35 V	0.734 A
1.3 V	0.55 A
1.2 V	0.127 A

Tabla 2-9: Corriente necesaria por tensión

A partir de todas las estimaciones y consideraciones enunciadas anteriormente se diseñó la siguiente distribución de tensiones:

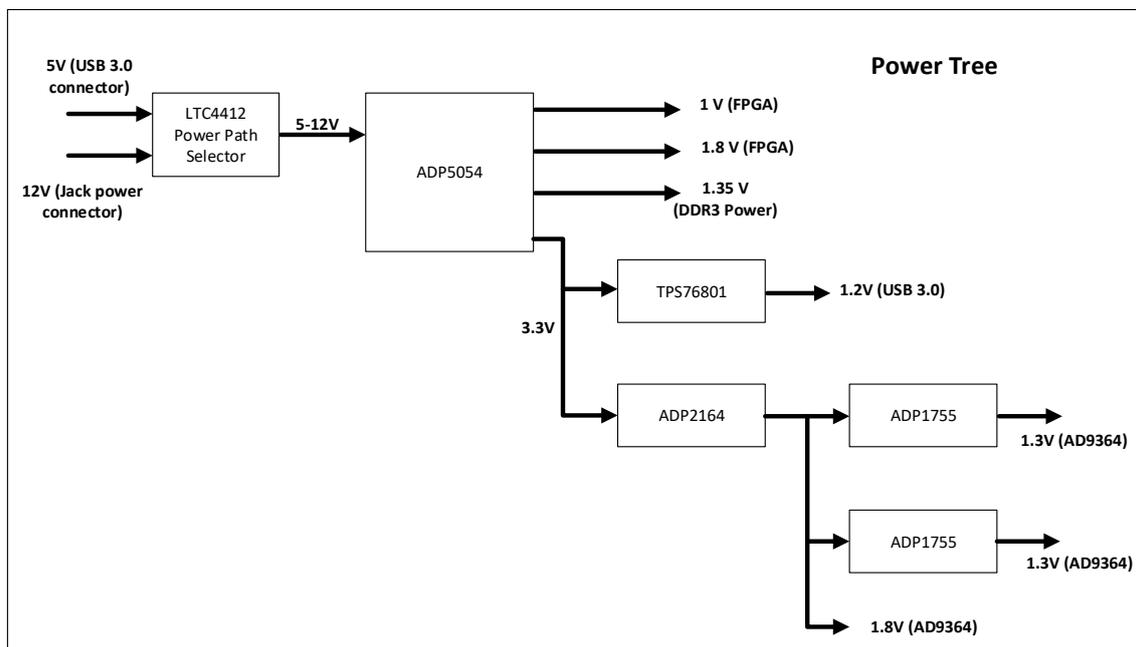


Figura 2-13: Diagrama distribución de tensiones.

Como se puede apreciar en el diagrama, la SDR puede ser alimentada tanto por USB 3.0 como por medio un jack externo. La selección entre ambas tensiones es realizada automáticamente

por el selector de camino LTC4412, el cual prioriza el de mayor tensión. Ante la presencia de ambas conexiones el sistema será alimentado por el Jack.

La potencia total del sistema, con consideraciones extremas, es de 5.4W con lo cual es posible que la potencia entregada por el USB3.0 (5W) no sea suficiente. Este posible problema con la potencia necesaria y la posibilidad de funcionamiento por medio de un puerto USB 2.0, son los principales motivos por los cuales se agregó la opción de alimentación por Jack.

2.2.6 GPIO y Leds

Para aprovechar los pines sin uso en la FPGA, se utilizaron los mismos para armar un GPIO como muestra la siguiente figura:

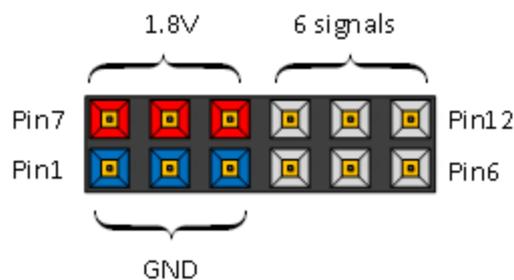


Figura 2-14: Pines de propósito general

GPIO Pin	FPGA Pin
4	M16
5	K15
6	K13
10	R12
11	N14
12	K12

Tabla 2-10: Asignación de pines GPIO-FPGA

Además también se agregaron 8 leds a la placa, los cuales van a ser de futura ayuda a la hora del debugging, para poder visualizar cualquier registró en forma de byte.

2.3 SDR a nivel sistema

En esta sección se presenta un posible esquema funcional de la SDR diseñada. Haciendo enfoque en el flujo de datos del sistema, HDL, interfaces, software, drivers, etc. Esto servirá como guía para quien ejecute la siguiente etapa de este proyecto. Este esquema se realizó en base a las siguientes referencias [16],[17],[18].

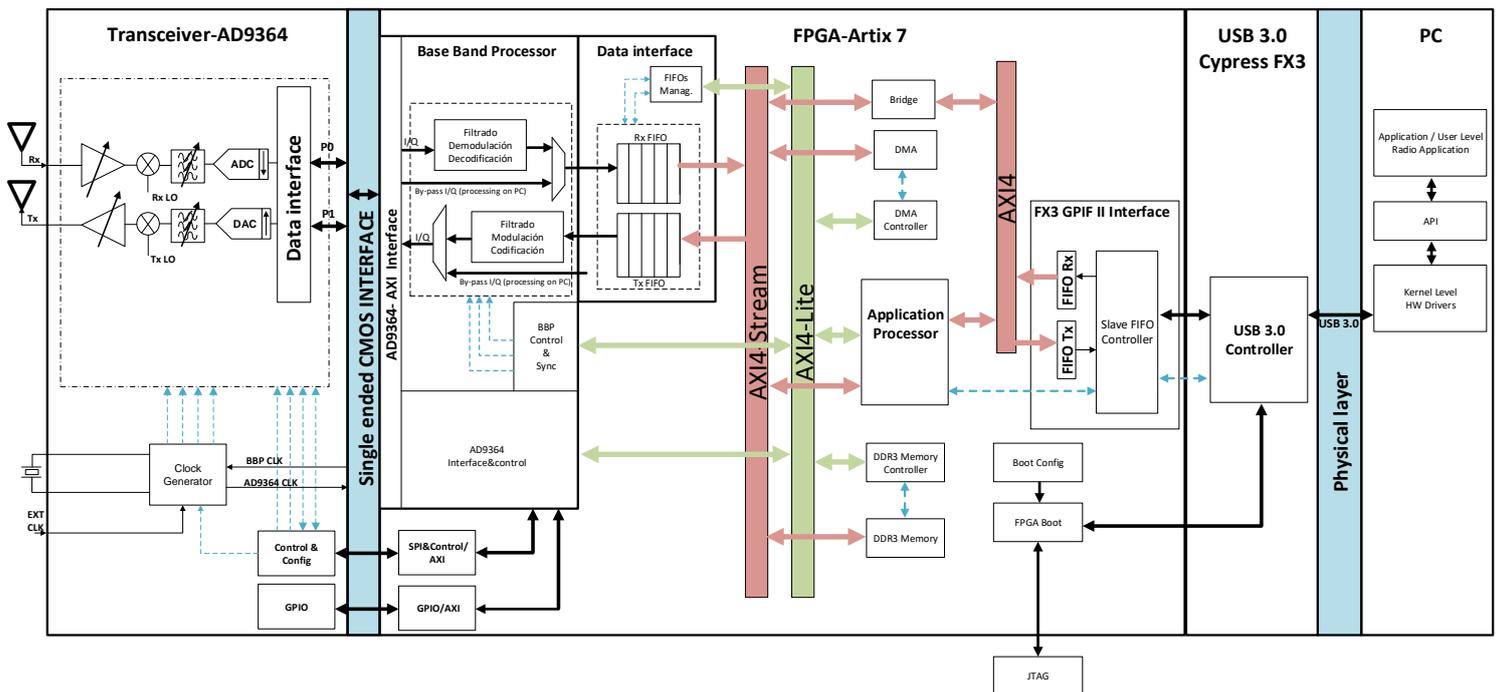


Figura 2-15: Esquema funcional SDR

2.3.1 HDL

A continuación se detallará la función de cada uno de los módulos a implementar en HDL:

Application Processor

El procesador implementado en la FPGA está destinado a:

- Control y configuración de: hardware y datos de la SDR para implementar la aplicación deseada.
- Encargarse interface del hardware con la aplicación en la computadora.

Para simplificar la interface entre la PC y el hardware de la SDR, el application processor puede correr Linux. Una opción para este app processor puede ser un MicroBlaze application processor (del cual se estimó la cantidad de recursos necesarios de la FPGA en la sección 2.2.3.1) el cual puede correr Linux. Este tipo de procesador tiene como requerimiento mínimo para poder embeberle Linux disponer de una memoria RAM de 32 MB o más.

Base Band Processor

Este procesador es el encargado de realizar los procesos de filtrado, modulación/demodulación, codificación/decodificación, scrambling/descrambling, sincronización/recuperación de portadora y demás procesos necesarios para el procesamiento. En el mismo se selecciona el camino de datos IQ dependiendo si el procesamiento se realiza en la PC (by-pass) o en el BBP. Como este procesador actúa como esclavo del application processor (AP), es posible que a la hora de entregar datos al AP, el mismo este ocupado. Por lo tanto es necesario la utilización de FIFOs para no perder información.

En este bloque se realizara el control, interface, sincronismo y configuración del AD9364 dependiendo las instrucciones enviadas por el AP. La configuración del transceiver dependerá del modo de funcionamiento (halfduplex Tx o Rx, fullduplex) en el que se encuentre y la información de los datos (BW, IF, gain, etc.).

FX3 GPIF II Interface

Esta interface es del tipo FIFO slave y se encarga del manejo de datos entre el AP y el controlador de USB 3.0. La misma es controlada por medio de una máquina de estado. Para más información ver [19]

FPGA AXI

Advanced eXtensible interface (AXI) es parte de las especificaciones de ARMs AMBA. El AXI es una interconexión punto a punto diseñada para sistemas alta performance y microcontroladores de alta velocidad. Esta interconexión punto a punto evita compartir el bus, permitiendo un ancho de banda alto y baja latencia. En la segunda versión de AXI (AXI4) existen tres tipos de interfaces:

- AXI4: Para requerimientos de alta performance en mapeo de memoria.
- AXI4-Lite: Para comunicaciones de mapeo de memoria de bajo rendimiento. Por ejemplo control y estado de registros.
- AXI4-Stream: Para transmisiones de datos de alta velocidad.

Para más información ver [20]

Bridge

La función de este puente (AXI4-AXI Stream) es encapsular las transacciones de AXI4 en un par de interfaces AXI4-Stream. Esto permite utilizar componentes AXI4s los cuales son de menor área y mayor velocidad. Para más información sobre este puente ver [21]

2.3.2 Programación FPGA

La configuración de la FPGA se realiza por medio controlador de USB 3.0 o por medio del JTAG, eliminando la necesidad de una memoria flash para programar la FPGA. La siguiente figura muestra el camino utilizado para la programación la FPGA.

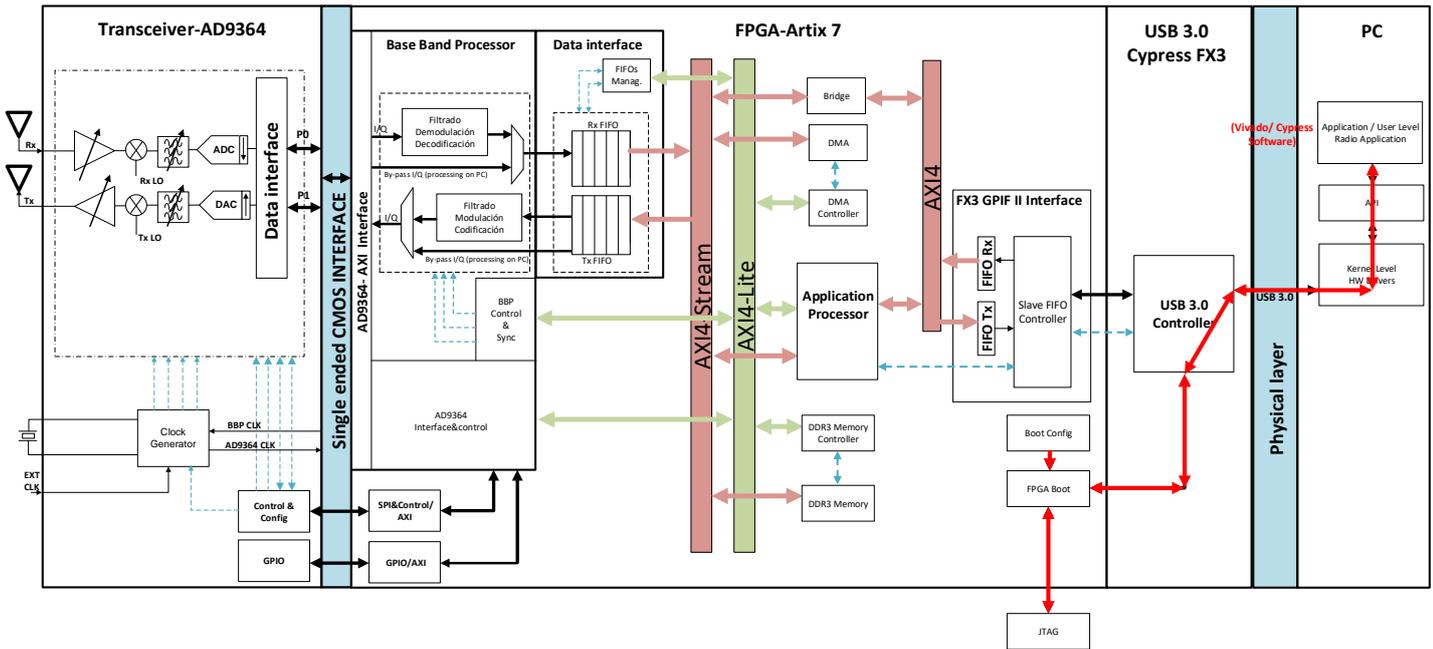


Figura 2-16: Programación de la FPGA

En el caso del controlador USB 3.0, actuando como master, configura la FPGA en modo Slave Serial.

Para poder realizar esta configuración, es necesario realizar las siguientes conexiones entre el controlador de USB 3.0 y la FPGA:

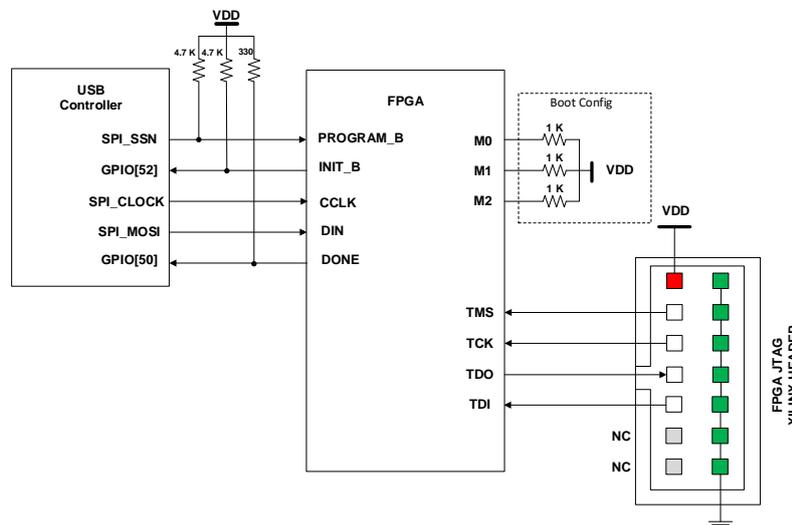


Figura 2-17: Diagrama en bloques configuración FPGA

En donde:

- **Program_B**: Cuando esta LOW por 500 ns o más, fuerza a la FPGA a reiniciar el proceso de configuración, limpiando la memoria de configuración.

- **INIT_B**: Low después de power on reset (POR) o cuando la FPGA está limpiando la memoria de configuración.
- **CCLK**: Clock de configuración.
- **DIN**: Entrada de datos serial para la configuración de la FPGA. Estos datos son capturados en los flancos ascendentes de CCLK.
- **DONE**: Low durante la configuración y HIGH cuando la configuración es terminada exitosamente.
- **M [2:0]**: Determinan la forma de configuración que tendrá la FPGA, dependiendo de los pull-down / pull-up que se conecten a estos pines.

La siguiente tabla indica los diferente modos de configuración de la FPGA dependiendo de M[2:0]:

Configuration Mode	M [2:0]	Bus Width	CCLK Direction
Master Serial	000	x1	Output
Master SPI	001	x1,x2,x4	Output
Master BPI	010	x8,x16	Output
Master SelectMap	100	x8,x16	Output
JTAG	101	x1	Not Applicable
Slave SelectMAP	110	x8,x16,x32	Input
Slave Serial	111	x1	Input

Tabla 2-11: Selección del modo de booting FPGA

El controlador de USB comienza a configurar la FPGA pulsando PROGRAM_B (t1) y monitoreando el pin INIT_B. Cuando el pin INIT_B está en HIGH (t2) la FPGA está lista para recibir los datos de configuración. El master empieza a suministrar los datos de configuración y la señal de clock hasta (t3):

- Que el pin DONE este en HIGH indicando una configuración exitosa (t4).
- Que el pin INIT_B este en LOW indicando un error en la configuración.

La siguiente figura muestra un diagrama de tiempo de las señales involucradas en la configuración de la FPGA.

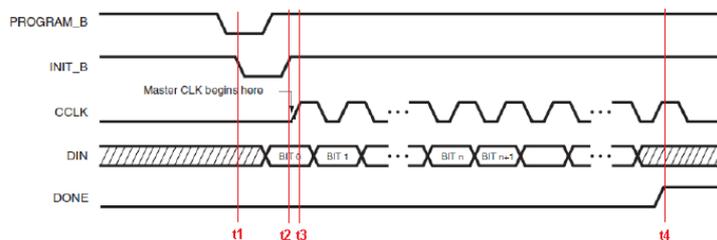


Figura 2-18: Diagrama de tiempos, configuración FPGA

Para más información sobre la programación de la FPGA vía USB ver [30]

2.3.3 SDR transmisión y recepción Half Duplex

Una vez programada y configurada la FPGA, la SDR se encontraría lista para correr la aplicación. El modo de operación dual port half dúplex es utilizado en aplicaciones que requieren operaciones TDD (time-division dúplex) y una tasa de datos hasta 61.44 MHz. En este modo ambos puertos son utilizados, el puerto P0 es asignado a los datos I y el puerto P1 es asignado a los datos Q. En este modo los puertos operan de forma bidireccional, la dirección es determinado por el canal que está activo: transmisión o recepción.

La siguiente figura muestra el flujo de datos en una transmisión en modo half-duplex:

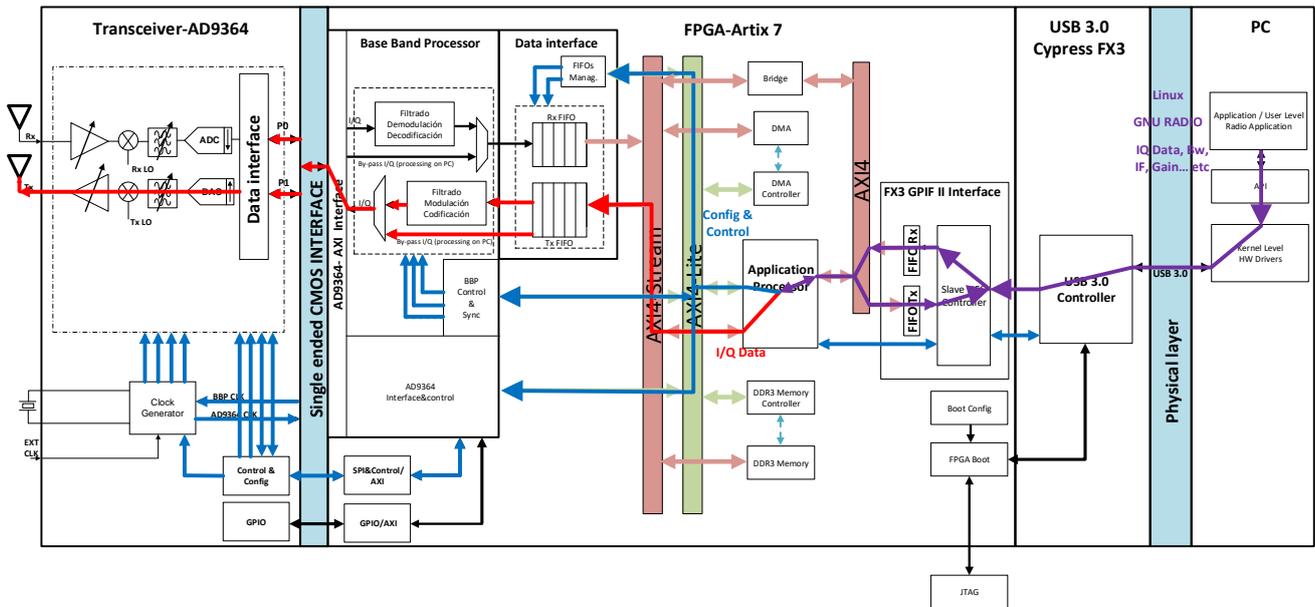


Figura 2-19: Esquema transmisión de la SDR

Primero se debe realizar la configuración (líneas azules) de los diferentes módulos (AD9364, BBP, FIFOs data interface, etc.) a partir de los datos de la señal (BW, IF, Gain, etc.) enviada desde GNU RADIO. Para luego poder transmitir los datos (líneas rojas) por medio del transceiver.

La siguiente figura muestra el flujo de datos en una recepción en modo half duplex:

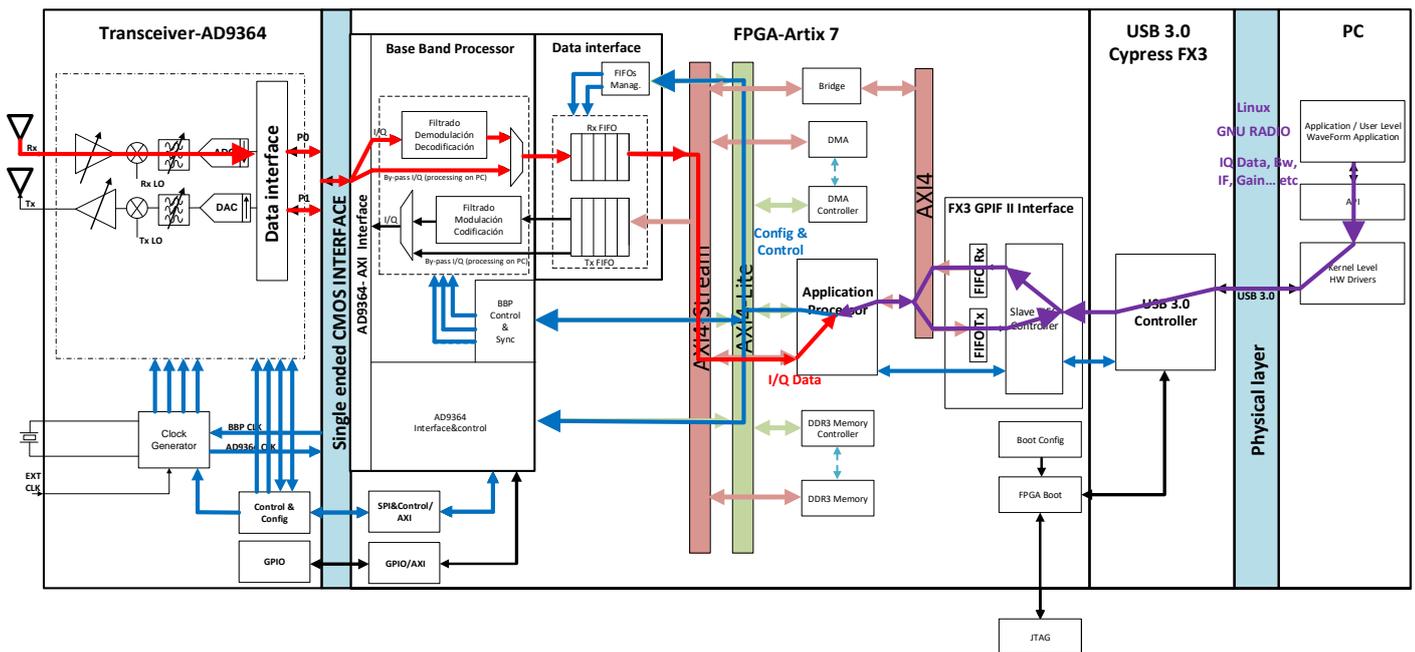


Figura 2-20: Esquema Recepción de la SDR

Para poder realizar la recepción el application processor, se deben realizar las configuraciones necesarias (líneas azules) de los diferentes módulos (AD9364, BBP, FIFOs data interface, etc.) dependiendo de la señal que se vaya a detectar. La señal recibida (líneas rojas) es amplificada, filtrada, pasada a banda base y digitalizada. Luego los datos IQ que son enviados a la PC, pueden ser procesados en el BBP o en la PC misma.

2.3.4 SDR transmisión y recepción Full Duplex

El modo de operación Dual Port Full Duplex es usado en aplicaciones que requieren operar en FDD (frequency-division duplex) y tasas de dato menores a 61.44 MHz. En este modo ambos puertos de datos son utilizados, P0 es asignado a los datos recibidos y P1 es asignado a los datos transmitidos. Cada bus de datos opera simultáneamente, permitiendo una transferencia full dúplex para los datos de transmisión y recepción entre el BBP y el AD9364.

La siguiente figura muestra el flujo de datos en una recepción en modo full duplex:

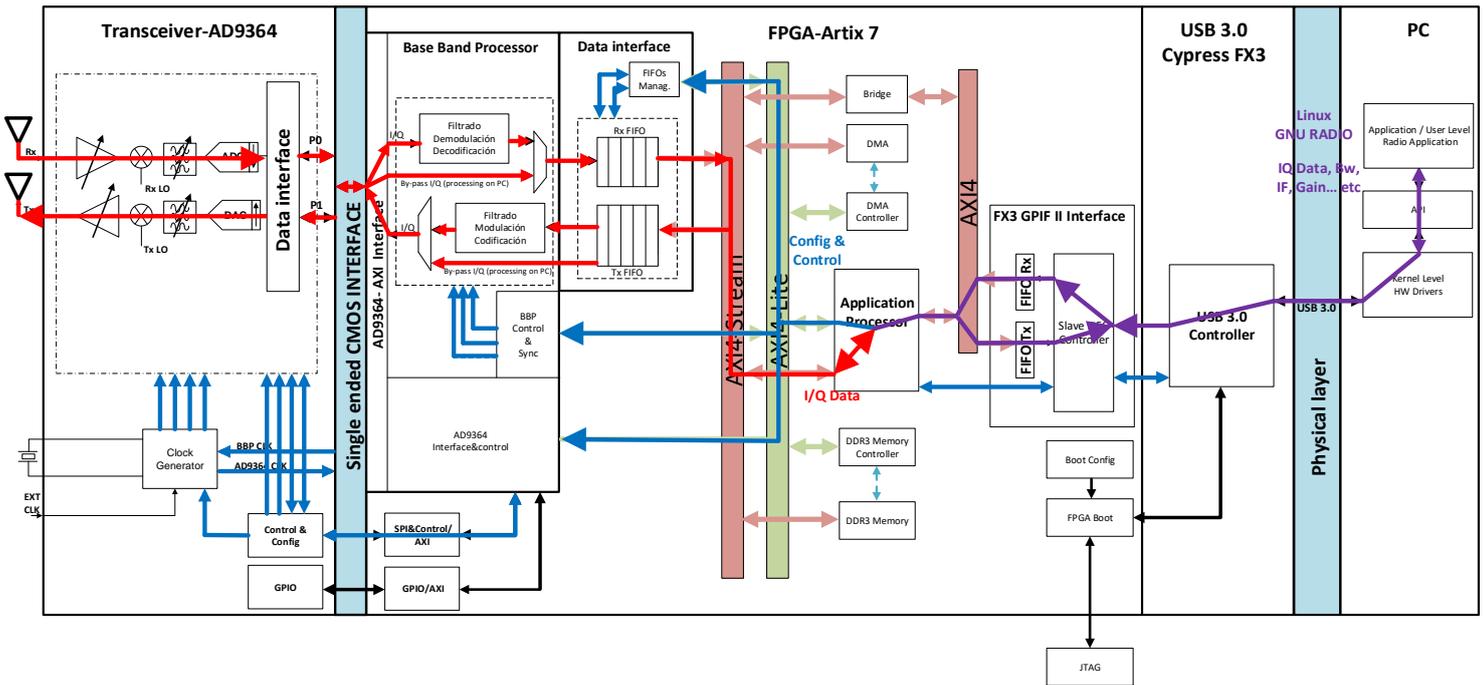


Figura 2-21: Esquema de operación Full Duplex

2.3.5 Software

2.3.5.1 Drivers

Si se embebe Linux en el application processor (por ejemplo utilizando un MicroBlaze Application Processor) entonces un posible esquema de utilización de drivers puede ser el siguiente:

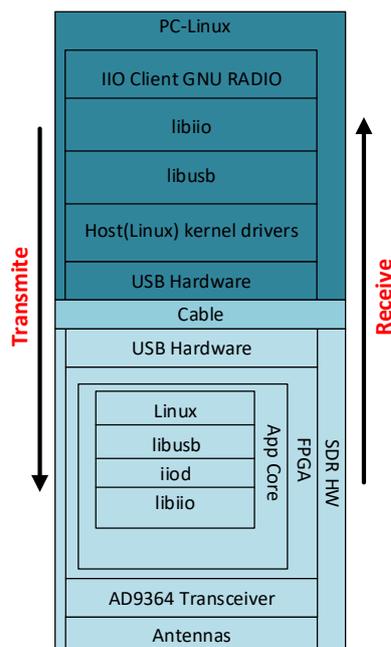


Figura 2-22: Hardware y drivers del sistema

Linux Industrial Input/Output (libiio)

El subsistema industrial Input/output (IIO) dentro del Linux kernel está destinado a proveer soporte para dispositivos. El IIO es un open-source estándar adoptado por diferentes fabricantes, ya que el mismo provee un API en común para tratar con una gran variedad de diferentes dispositivos. Entre esta variedad de dispositivos podemos encontrar: ADCs, Accelerometers, capacitance to digital converters (CDCs), phase-locked loops (PLLs), etc.

El libiio es utilizado como interface con el subsistema de IIO. Este puede ser utilizado en un dispositivo con Linux embebido o para comunicarse remotamente con el mismo dispositivo desde un host Linux, Windows o Mac a través de USB, Ethernet o Serial.

Libiio fue desarrollado principalmente por Analog Devices. Es una librería open-source Publicada bajo: GNU Lesser General Public Licence. Esta licencia es open source, permitiendo que cualquiera utilice esta librería en cualquier procesador/FPGA/Soc que pueda estar controlando a cualquier dispositivo periférico como por ejemplo: ADC, DAC, hasta incluso un transceiver como el AD9364.

Para más información sobre libiio de Analog Devices y los drivers del AD9364 ver [22][23]

Libusb

Libusb es una librería de c que provee un acceso genérico a dispositivos USB. Su propósito es para ser utilizado por desarrolladores, facilitando la producción de aplicaciones las cuales requieran comunicación vía USB con el hardware.

El firmware de FX3, contiene la librería Cyusb_Linux_1.0.4 en la cual se encuentran funciones para realizar una comunicación con un Linux Host. Estas funciones están basadas en los paquetes de la librería libusb. Para más información ver [24][25]

Industrial Input/Output Daemon (iiod)

El iiod es el responsable de permitir la conexión remota con el cliente IIO en este caso el application processor.

2.3.5.2 GNU Radio

GNU Radio es un software gratuito, licenciado bajo GPL, el cual consta con un kit de herramienta para la implementación de radios definidas por software. Inicialmente era utilizado por radio amateurs, pero luego obtuvo un gran interés por los investigadores en el área de wireless, teniendo hoy en día una gran comunidad de usuarios y contribuidores. Este programa fue diseñado para Linux y sus paquetes están pre-compilados para la mayoría de distribuciones de Linux.

GNU Radio proporciona medios para realizar parte del procesamiento digital de un sistema de comunicaciones. Como también algoritmos para definir: filters, channel codes, synchronization elements, equalizers, demodulators, decoders y muchos otros elementos. Estos componentes pueden ser utilizados como bloques para armar un sistema de comunicación, por ejemplo la siguiente figura muestra un receptor de FM en GNU Radio:

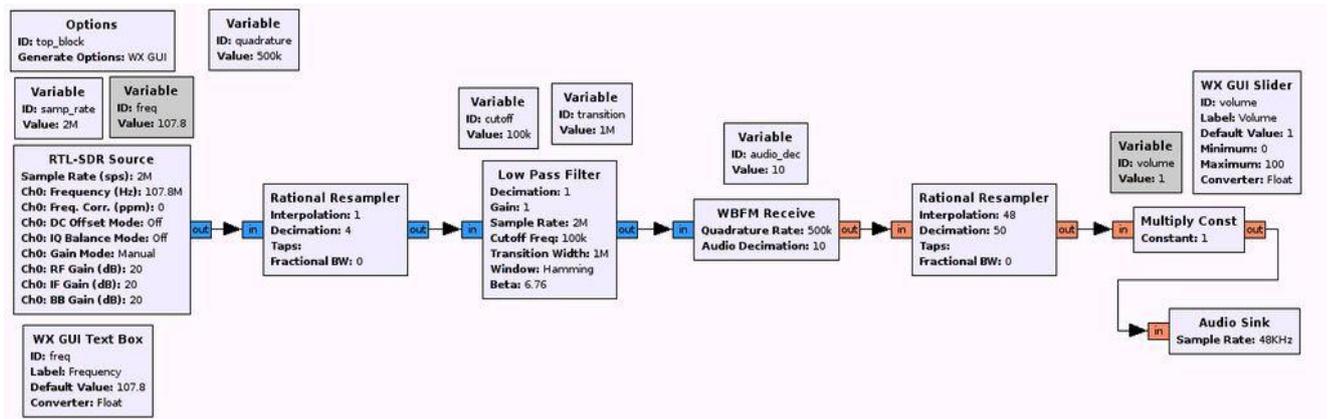


Figura 2-23: Receptor de FM, GNU Radio

El manejo de datos es realizado por el software y es transparente al usuario. El tipo de dato tanto en la recepción como en la transmisión son muestras complejas en banda base. La aplicación primaria de GNU Radio está escrita en el lenguaje de programación Python, los bloques utilizados en este programa pueden estar escritos en Python o en C++.

2.4 SDR Características

Resumiendo la SDR tendrá las siguientes características:

Capacidades RF:

- 1xTX & 1xRX Half o Full Duplex
- 70 MHz a 6 GHz de rango de frecuencia
- Hasta 56 MHz de ancho de banda

Interface y alimentación:

- USB 3.0
- Alimentación por USB o Jack

Hardware:

- FPGA Artix-7 XC7A100T
- DDR3 Memory 256 MB
- GPIO
- JTAG & USB boot

¿Qué tan lejos?:

Por lo general tanto en esta SDR como en la mayoría, no es posible determinar que tal lejos puede transmitir. Ya que la distancia depende de muchos factores: carrier frequency, tipo de modulación, ancho de banda, antenas, medio ambiente local (topografía, vegetación, clima), etc.

Por ejemplo la siguiente figura muestra como varia la potencia de salida del transceiver AD9364 en función de la frecuencia y la temperatura.

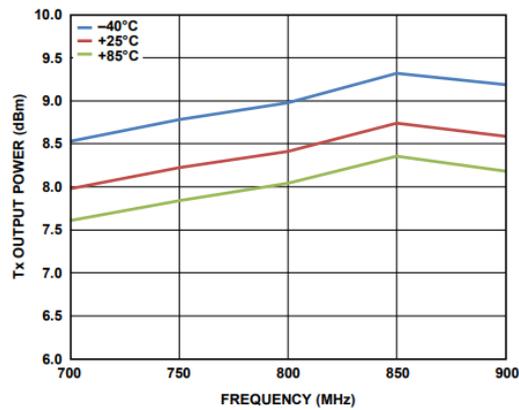


Figura 2-24: Potencia salida transceiver

Espectro de frecuencia

La siguiente figura muestra las bandas que se encuentra dentro del espectro de la SDR. Además también se brinda algunas asignaciones de frecuencia dentro del espectro frecuencia argentino, regulado por ENACOM [26].

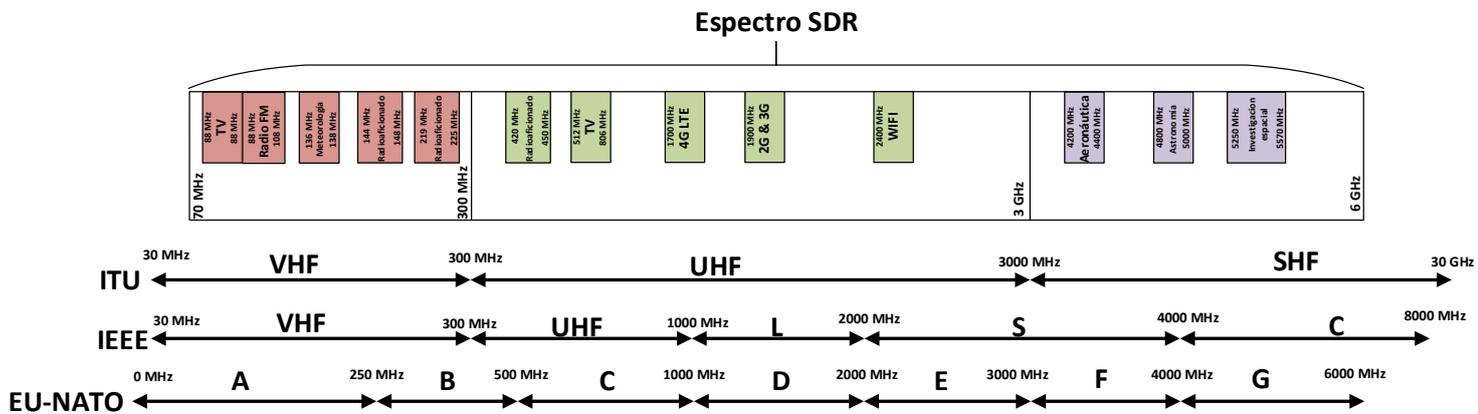


Figura 2-25 : Bandas y asignaciones de frecuencia

Capítulo 3

3. Diseño con herramienta CAD

3.1 Herramienta CAD

La herramienta imprescindible para llevar a cabo un buen diseño electrónico es un programa informático CAD. Existen muchas alternativas a gusto del diseñador, aunque las mejores opciones son alguna de las desarrolladas por las principales compañías que llevan desarrollando este tipo de software: Cadence, Altium Designer, Eagle o MentorGraphics están entre las más usadas.

En este proyecto se decidió usar Altium Designer debido a previo conocimiento de esta herramienta.

3.1.1 Esquemático

Este programa permite realizar el diseño del esquemático en forma jerárquica, pudiendo dividir el proyecto en módulos funcionales. Cada uno de estos módulos será desarrollado en sheets (con sus correspondientes circuitos), logrando un mejor seguimiento, orden según funcionalidad y facilidad a la hora de diseñar.

Las conexiones entre estos sheets se encuentran en un primer archivo como se muestra en la figura 3-1. Estas conexiones se realizan por medio de puertos los cuales pueden ser unidireccionales o bidireccionales.

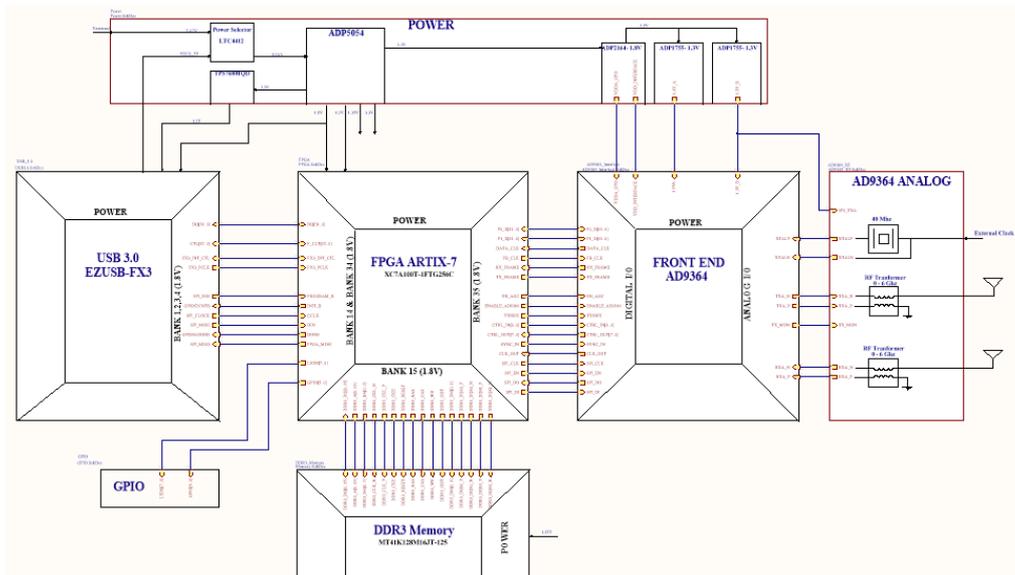


Figura 3-1: Esquemático en forma jerárquica, primer sheet.

Por otra parte, tanto a los componentes como a las conexiones se les pueden asignar diferentes clases o directivas, las cuales pueden estar sujetas a determinadas reglas de diseño que el programa tendrá en cuenta en la etapa del ruteo del PCB y serán aplicadas automáticamente. Por ejemplo, se pueden seleccionar un conjunto de líneas de datos y asignarles una netclass para

luego aplicarle reglas de ruteo a la misma (impedancia, separación entre líneas, máxima diferencia entre líneas, etc.)

3.1.2 Componentes

Para una mejor organización del proyecto a cada componente se le agrego información extra en sus propiedades dentro del esquemático. La siguiente figura muestra dichas propiedades:

Parameters			
Visible	Name	Value	Type
<input type="checkbox"/>	Vendedor2	Digi-Key	STRING
<input type="checkbox"/>	Vendedor1	Mouser	STRING
<input type="checkbox"/>	Value	Value	STRING
<input type="checkbox"/>	Tolerance		STRING
<input type="checkbox"/>	Stock2	0 en pedido	STRING
<input type="checkbox"/>	Stock1	1200 en pedido 5 de junio	STRING
<input type="checkbox"/>	Requerimiento		STRING
<input type="checkbox"/>	PartNumber	ADP5054ACFZ-R7	STRING
<input type="checkbox"/>	Package	LFCSF-48	STRING
<input type="checkbox"/>	Manufacturer	Analog Devices	STRING
<input type="checkbox"/>	LinkVendedor2	https://www.digikey.com/product-detail/A	STRING
<input type="checkbox"/>	LinkVendedor1	https://ar.mouser.com/ProductDetail/A	STRING
<input type="checkbox"/>	Descripción	Reguladores de voltaje,SMD,48pins	STRING
<input type="checkbox"/>	DataSheet	http://www.mouser.com/ds/2/609/ADP	STRING
<input type="checkbox"/>	CostoVendedor2	10.76	STRING
<input type="checkbox"/>	CostoVendedor1	9.88	STRING

Figura 3-2: Información componentes del esquemático

Este agregado de información ayuda a la futura construcción de la lista de materiales (BOM), el pedido y compra de los diferentes componentes.

Además estos cada uno de los componentes utilizados contienen otro tipo de información como puede ser: el símbolo, footprint y modelo 3D. La información de todos los componentes utilizados en este proyecto fueron almacenados en una sola librería.

3.2 Conexiones

Las conexiones de cada dispositivo fueron realizadas según la indicación de diferentes data sheets y guías de diseño, las cuales se encuentran en el [Anexo 5.5](#).

Además se tuvo en cuenta los “absolute maximum ratings” de todos los dispositivos, para no superar ninguna tensión máxima en los pines de cada integrado. Por ejemplo en un enabel del ADP5054 se agregó un divisor resistivo en su entrada para no superar su tensión máxima de entrada (+6.5V) cuando es alimentado por medio del Jack.

En las siguientes secciones se comentaran algunas otras particularidades que se tuvieron en cuenta a la hora de realizar las conexiones.

3.2.1 FPGA

3.2.1.1 Bancos I/O

Para realizar las conexiones entre los diferentes bancos del FPGA y los componentes principales (transceiver, controlador USB 3.0 y memoria), se tuvo en cuenta los niveles de tensión e impedancia en cada una de las interfaces. En la siguiente figura se indica la asignación de pines, tensión e impedancia de las diferentes conexiones:

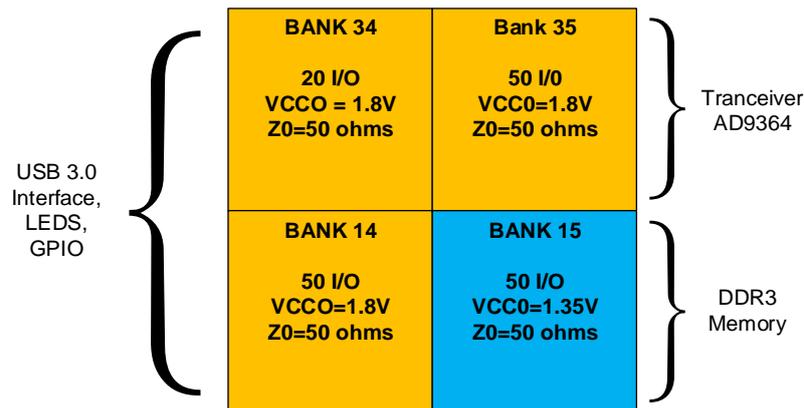


Figura 3-3: Interface de los bancos de la FPGA

Además cada uno de estos bancos tiene pines que sirven para determinadas funciones, como por ejemplo los pines MRCC. En estos pines se conectarán la mayoría de las señales de clock, ya que por medio de estos se puede distribuir dichas señales a múltiples regiones de clock dentro de la FPGA.

La FPGA también tiene un banco 0, este es un banco específico que contiene los pines necesarios para configuración, programación y reseteo. Además este banco puede ser alimentado con diferentes tensiones, en este caso 1.8V para tener los mismo niveles de tensión que su programador, el controlador de USB 3.0 (el JTAG también tiene la misma tensión).

3.2.2 Power

Para realizar las conexiones en la sección de alimentación se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

- Se agregaron headers para separar la alimentación por etapas.
- Se realizaron simulación del funcionamiento de la mayoría de los reguladores y el selector de camino de alimentación.
- Utilización de la aplicación “ADP505x BuckDesigner” tanto para las conexiones como para la selección de los componentes del regulador ADP5054.

La mayoría de estos ítems están detallados en el [Anexo 5.2](#) y [Anexo 5.3](#).

3.2.3 Transceiver AD9364

Para realizar la mayoría de las conexiones del transceiver se utilizó: la placa de evaluación del AD9364 “AD-FMCOMMS4-EBZ” (por recomendación del fabricante) y la guía de diseño de hardware que provee el fabricante.

3.2.4 USB 3.0

Para realizar la mayoría de las conexiones del controlador de USB 3.0 se utilizó: la placa de desarrollo “SUPERSPEED EXPLORER KIT” (por recomendación del fabricante) y la guía de diseño de hardware que provee el fabricante.

3.3 Capacidades del fabricante PCB

El diseño del PCB se adecuó a las capacidades de fabricación de la compañía “PCB Prototype”. Estas capacidades establecen algunos requerimientos principales para el diseño PCB:

- Mínimo ancho de pista y espaciado:

Estos requerimientos estipulan la distancia mínima entre dos pistas y el ancho de las mismas. Dicha distancia mínima es de 3 mil (0.076 mm) para ambos requerimientos.

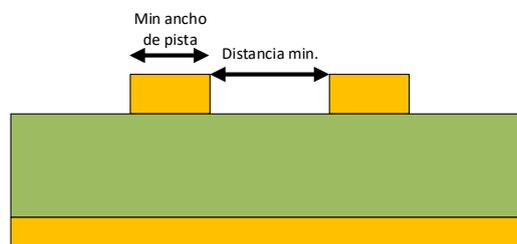


Figura 3-4: Restricción distancia mínima en PCB

- Mínimo tamaño de agujero y anular ring

El mínimo tamaño de agujero es de 0.15 mm, mientras que el anular ring es de 0.1 mm.

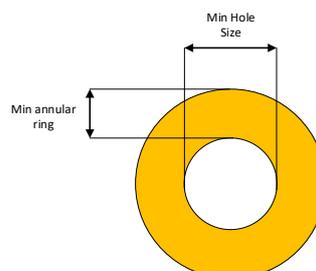


Figura 3-5: Restricciones tamaño agujero en PCB

Estos requerimientos son esenciales para poder determinar si va ser posible realizar el “fanout” (llevar cada uno de pines de un componente BGA hacia fuera del integrado) de los componentes BGA. Ya que a partir de estos requerimientos se podrá determinar si el espacio entre las vías es suficiente para que pasen pistas a través del mismo.

La siguiente figura muestra cómo queda restringido el espacio entre los pad de los componentes BGA para el ruteo de las señales:

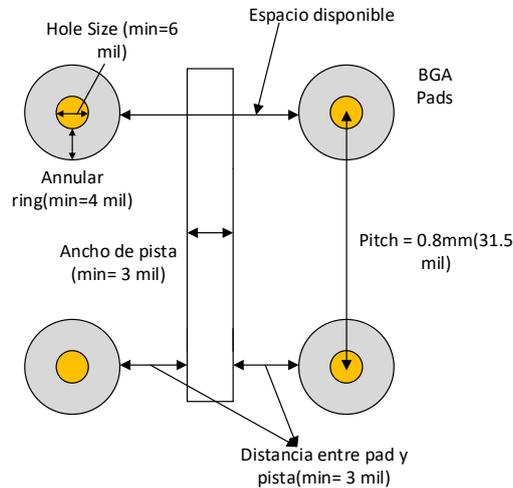


Figura 3-6: Espacio disponible en componentes BGA

En la siguiente figura se puede apreciar una parte del ruteo de uno de los componentes BGA con pitch 0.8mm (USB 3.0 controller):

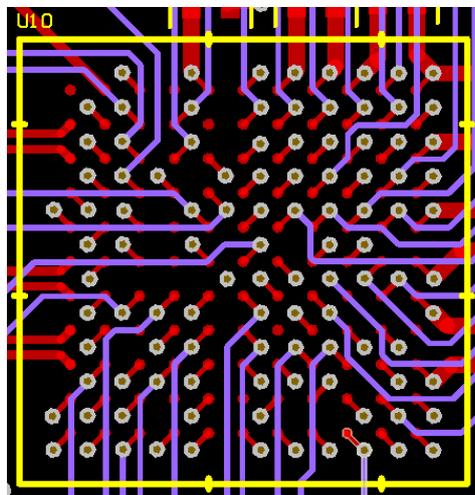


Figura 3-7: Ejemplo de ruteo, componente BGA

Para más información sobre todas las capacidades del fabricante ir al [Anexo 5.5](#)

3.4 Distribución de componentes y características físicas

Antes de comenzar con el ruteo de la placa, hay que estimar si las dimensiones de la misma son suficiente para dar cabida a todos los componentes y permitir su interconexión. Así como mantener a cierta distancia aquellos que tiendan a generar más calor.

La siguiente figura muestra una de las capas mecánicas en donde se puede distinguir la colocación de los diferentes componentes. La posición ideal para la FPGA es en el centro, ya que las líneas que salen de ella se distribuyen radialmente hacia los componentes que la rodean.

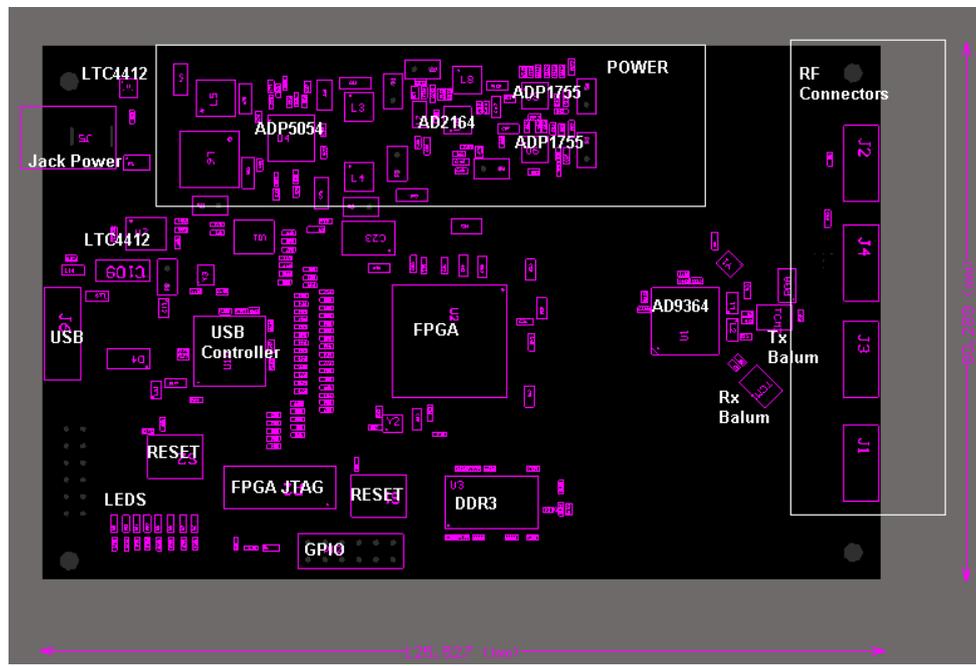


Figura 3-8: Distribución de los componentes en la placa

En el extremo izquierdo de la placa se encuentra la conexión USB y el conector Jack para alimentación externa. Mientras que en el extremo derecho se encuentran las conexiones de RF para transmisión y recepción.

Las interfaces de usuario se han colocado en lugares accesibles para tener buena operatividad y además lejos de la FPGA ya que las líneas no se consideran críticas.

Las dimensiones de la placa son de aproximadamente 12.5x8 centímetros y tiene un grosor de 1.6mm. Además tiene 4 agujeros de montaje los cuales están conectados a GND.

3.5 Stackup

La estructura de una PCB está constituida por un conjunto de láminas de cobre apiladas y separadas por un material aislante. La manera en la que se distribuyen estas capas, junto con sus respectivos grosores y materiales utilizados se conoce como el stack-up de la placa.

Cuando se va a diseñar una placa con varias capas y con líneas de alta velocidad el primer paso a dar es definir el stack-up o una buena aproximación de él. Para ello se deben tener en cuenta factores como presupuesto, integridad de la señal, impedancias y distribución de la energía.

Para definir el stackup se tuvo en cuenta:

- Por recomendación del transceiver AD9364 la segunda capa y la ante ultima deben ser GND (plano de cobre sin ninguna división) .Esto es crucial para mantener integridad de señal de RF y performance del AD9364. Además también estipula que las señales digitales deben ser ruteadas por las capas internas.

- Debido a la cantidad de tensiones diferentes, un solo plano no basta para distribuir todas las tensiones a los módulos pertinentes, por lo que se decidió utilizar 2 planos de tensión.
- La cantidad de capas de señal deben ser las suficientes para poder realizar el ruteo de todos los componentes .En este caso el componente con mayor densidad de señales es la FPGA, por lo tanto esta determinara la cantidad de capas necesarias para el ruteo de todas las señales.

Para determinar la cantidad de capas necesarias Xilinx provee una fórmula para estimar la misma:

$$Layers = \frac{Signals}{Routing\ Channels \times Routes\ per\ Channel}$$

En donde:

Routing Channels: Son el número de caminos de salida disponibles hacia fuera del BGA. Es decir el número de pines de un lado del BGA menos uno, cuatro veces (debido a los cuatro lados del componente). En este caso el encapsulado es de 16x16, obteniendo un total de 60 Routing Channels (15x4).

Router per Channel: Puede ser uno o dos dependiendo si una o dos señales son ruteadas entre los pads del BGA. En este caso solo se realizara el ruteo de una señal entre los pads.

Señales: La siguiente tabla indica la cantidad de señales que corresponden a la FPGA:

Sección	Nº Señales
FPGA-USB	53
FPGA-AD9364	48
FPGA-DDR3	46
FPGA-GPIO	16
FPGA Misc.	13
Total	176

Tabla 3-1: Cantidad de señales por sección

$$Layers = \frac{176}{60 \times 1} = 3 \text{ (redondeado)}$$

Debido a que el número de capas de un PCB deben ser par se decidió utilizar 4 capas de señales.

- Las impedancias necesarias para cada sección:

Sección	Tipo	Impedancia	Layer	Medidas
AD9364	Diferencial	100 Ω	Top	W=0.267mm,S=0.127mm
			Bot	W=0.145mm,S=0.127mm
	Individual	50 Ω	Top	W=0.5mm
			Bot	W=0.105mm
			Signal 1	W=0.105mm
		Signal2	W=0.189mm	
USB 3.0	Diferencial	90 Ω	Top	W=0.203mm, S=0.152mm
	Individual	50 Ω	Top	W=0.5mm
			Bot	W=0.105mm
			Signal 1	W=0.105mm
			Signal 2	W=0.189mm
FPGA	Diferencial	80 Ω	Signal1	W=0.112mm,S=0.102mm
			Bot	W=0.145mm,S=0.127mm
	Individual	50 Ω	Top	W=0.5mm
			Bot	W=0.105mm
			Signal 1	W=0.105mm
		Signal 2	W=0.189mm	
Memory	Diferencial	100 Ω	Bot	W=0.145mm,S=0,127mm
	Individual	50 Ω	Top	W=0.5mm
			Bot	W=0.105mm
			Signal 1	W=0.105mm
			Signal 2	W=0.189mm

Tabla 3-2: Impedancias de cada sección

Teniendo en cuenta toda las cuestiones mencionadas anterior mente se diseñó el siguiente stackup:

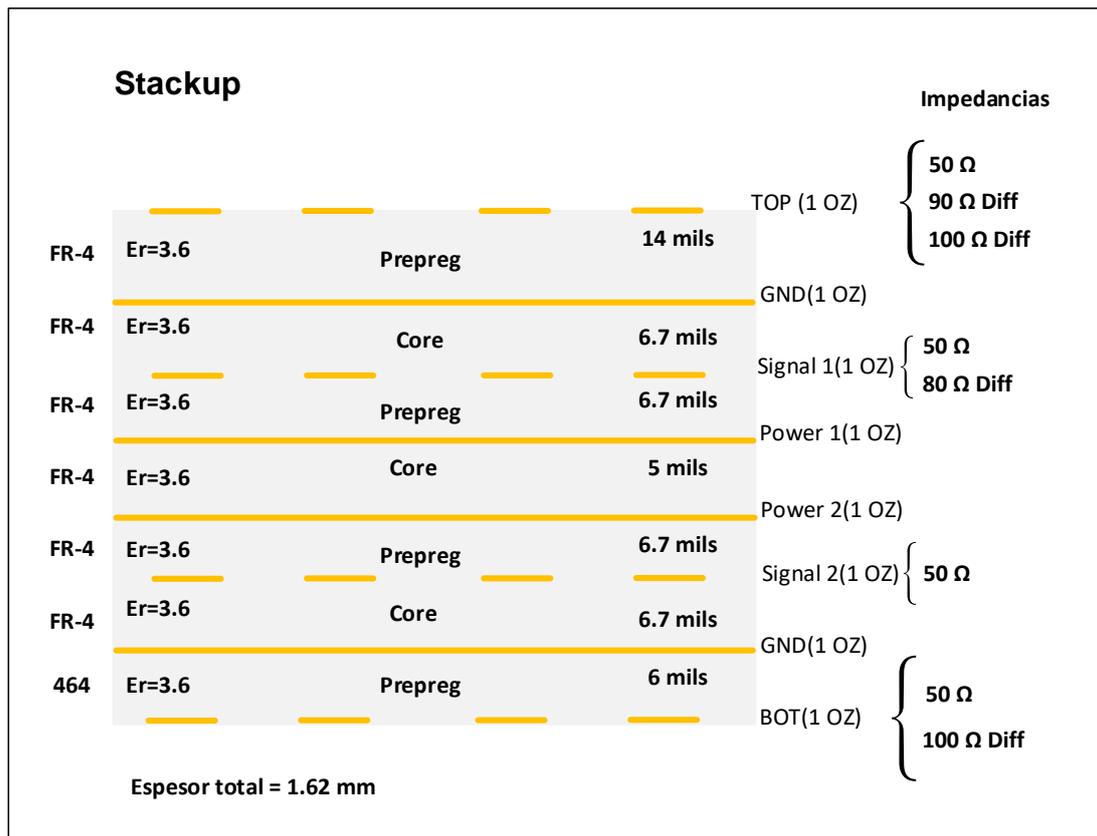


Figura 3-9: Stack up del PCB

Para obtener la constante dieléctrica del material se contactó vía mail con el fabricante del PCB “PCB Prototypes”, los cuales suministraron la información necesaria para realizar el stackup.

3.6 Líneas de transmisión

Cuando las señales son del orden de las decenas de los MHz estas pueden ser tratadas como líneas de transmisión.

El camino que recorre una señal puede ser considerado a como una línea de transmisión cuando la relación entre su longitud de onda y la distancia que esta señal recorre son de magnitudes similares.

3.7 Impedancia característica, reflexión y terminación

Una de las propiedades de una línea de transmisión es su impedancia característica, Z_0 . Cuando se diseña una línea de transmisión entre un emisor y un receptor, las impedancias: de salida del receptor, de la línea y de entrada del receptor deben estar adaptadas. Si no se ajusta bien esta adaptación de impedancias se producen reflexiones y oscilaciones dentro de la misma línea provocando una degradación de la señal o incluso el fallo completo de la comunicación.

La impedancia característica es una propiedad de la línea de transmisión que depende únicamente de su geometría (alto, ancho y forma) y de las propiedades del material dieléctrico que la

componen (aire, FR4, etc.) siendo independiente de la longitud de la línea. Por tanto es importante que la línea de transmisión preserve su forma y geometría durante todo el recorrido de la señal para mantener una continuidad en su impedancia característica.

En un PCB los parámetros de fabricación como el grosor del laminado de cobre, el tamaño del material dieléctrico (distancia al próximo plano solido) y constante dieléctrica, son los parámetros que van a permitir calcular la geometría de la línea para conseguir la impedancia característica deseada.

A continuación se muestran los dos casos que podemos encontrar en el diseño de esta SDR.

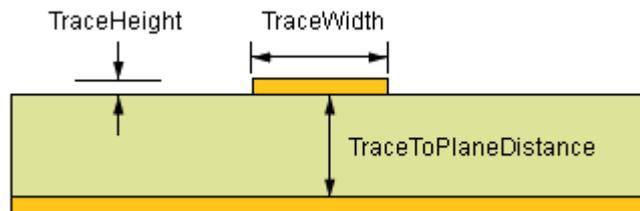


Figura 3-10: Microstrip

Fórmula utilizada por Altium Designer para el cálculo de impedancia en Microstrip:

$$Z_0 = \frac{87}{\sqrt{e_r + 1.41}} \times \ln\left(\frac{5.98 \times H}{0.8 \times W + T}\right)$$

En donde:

H = Distancia entre pista y plano

W = Ancho de pista

T= Grosor de pista

Er= Constante dieléctrica del material dieléctrico.

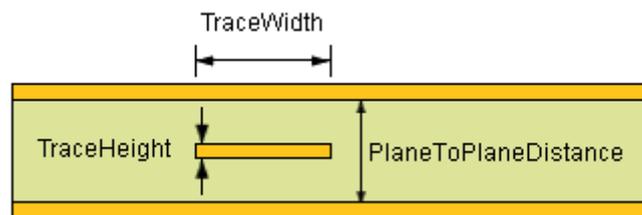


Figura 3-11: Strip line

Fórmula utilizada por Altium Designer para el cálculo de impedancia en Stripline:

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \times \ln\left(\frac{1.9 \times B}{0.8 \times W + T}\right)$$

En donde:

B = Distancia entre planos

3.8 Líneas diferenciales

Las señales que se transmiten de modo diferencial viajan a través de dos líneas acopladas, presentando la misma magnitud en ambas y signo opuesto.

Una de las principales ventajas de las señales diferenciales es su superior inmunidad al ruido frente a las señales individuales. Cuando una interferencia electromagnética afecta a la señal diferencial, afecta a las dos líneas por igual y, puesto que en el receptor se mide la diferencia entre ambas, se suprime el efecto del ruido y se puede recuperar fácilmente la señal original.

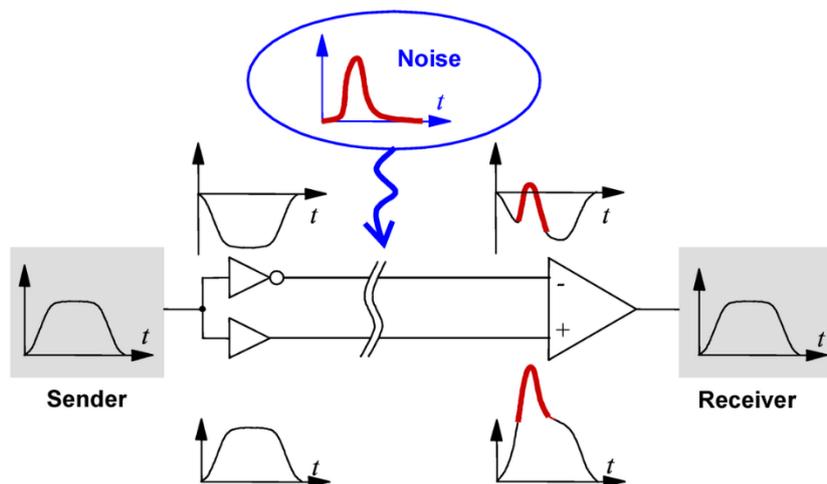


Figura 3-12: Propiedad de las líneas diferenciales

En la SDR la mayoría de las señales de alta velocidad se transmiten en modo diferencial. Al igual que las líneas individuales, las líneas diferenciales también presentan una impedancia característica, Z_0 . En este caso también se calcula en función de la geometría del par diferencial y de las propiedades del stackup, interviniendo además la separación entre las líneas como muestra la siguiente figura:

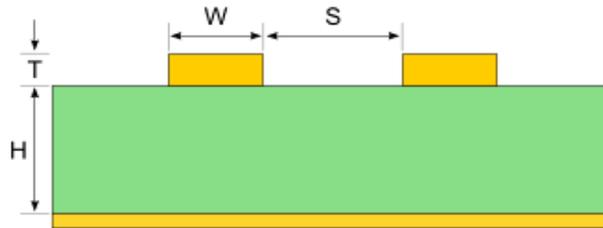


Figura 3-13: Líneas diferenciales en PCB

La herramienta Altium Designer no hace cálculos de impedancias diferenciales, por lo que se utilizó un programa realizar dicho calculo. Los cálculos realizados con este programa auxiliar se encuentran en el [anexo5.3](#).

3.9 Ajuste de longitudes

Cuando varias señales de alta velocidad pertenecen a un mismo grupo o bus de datos que funcionan de forma síncrona, es importante que todas tengan la misma distancia eléctrica, es decir, que todas las señales eléctricas lleguen dentro de un pequeño intervalo de tiempo que garantice el correcto funcionamiento circuito (lo ideal sería que todas lleguen al mismo tiempo).

A menudo, estas señales se encuentran, en línea recta, a diferentes distancias cada una de su destino. Por ello es preciso forzar a que las líneas más cortas realicen un recorrido extra para igualar al recorrido de la línea más larga del grupo.

Este criterio se tuvo en cuenta en varias secciones del diseño de la SDR:

- Interface GPIF II entre el controlador de USB3.0 y la FPGA
- Líneas de dato, adres y control en la memoria DDR3
- Líneas de datos y clocks entre la FPGA y el transceiver AD9364

La siguiente figura muestra como mediante la utilización de serpentinas o ruteo en forma de laberinto se equiparan los largos de las líneas de datos en interface entre la memoria DDR3 y la FPGA.

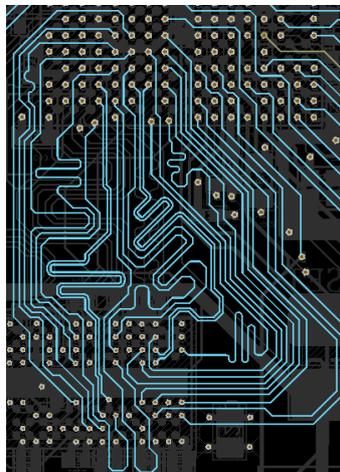


Figura 3-14: Ejemplo ruteo líneas de datos, memoria DDR3

Data Group	Largo (mil)	Data Group	Largo (mil)
DDR3_DM0	1351	DDR3_DQ9	1363
DDR3_DQ14	1351	DDR3_DQ7	1364
DDR3_DM1	1353	DDR3_DQ10	1364
DDR3_DQS0_N	1353	DDR3_DQ5	1365
DDR3_DQS1_N	1355	DDR3_DQ13	1365
DDR3_DQ8	1357	DDR3_DQ12	1365
DDR3_DQ0	1358	DDR3_DQ15	1.365
DDR3_DQ2	1358	DDR3_DQ6	1.365
DDR3_DQ1	1360	DDR3_DQS1_P	1.365
DDR3_DQS0_P	1361	DDR3_DQ3	1.367
DDR3_DQ11	1361	DDR3_DQ4	1.367

Tabla 3-3: Longitud de líneas de datos, memoria DDR3

3.10 Consideraciones tomadas al Rutear la placa

El ruteo de cada módulo se hizo de acuerdo a las guías de diseño provistas por cada fabricante. Algunas de las recomendaciones, criterios y herramientas utilizadas se encuentran en los [Anexo 5.1](#) , [Anexo 5.2](#) , [Anexo 5.3](#) y [Anexo 5.4](#).

3.10.1 FPGA

- Todas las pistas tienen impedancia de 50 Ω .
- El plano de power de mayor necesidad se encuentra más cerca de la FPGA (1V FPGA)
- Cristal lo más cercano a la FPGA posible

3.10.2 Power

- Se calculó de tamaño de vías para determinar si pueden suministrar la corriente necesaria.
- Uso de vías de escape térmico

3.10.3 USB 3.0

- Ajuste de largo de pista utilizando la herramienta xSignals.
- Utilización de protección ESD
- Calculo impedancia Diferenciales

3.10.4 AD9364

- Criterio de cero diferencia de longitud entre las líneas de interface digital con la FPGA.
- Interface entre el transceiver y las antenas.
- Coplanar Waveguide y ajuste de impedancia 50Ω para lograr un ancho similar al conector de RF y no tener desadaptación de impedancia.
- Simulaciones de adaptación de impedancia en el ruteo del PCB, en la sección de RF Rx, utilizando el software Advanced Systems Design (ADS).
- Pista en el top para posible shielding.

3.11 Planos de alimentación y tierra

Como se ha explicado en la sección 3.5, de las 8 capas con que cuenta el PCB, 2 son planos de tierra y 2 son para planos de alimentación. Las siguientes figuras mostraran como están distribuidas las diferentes tensiones y la solidez de los planos de GND.

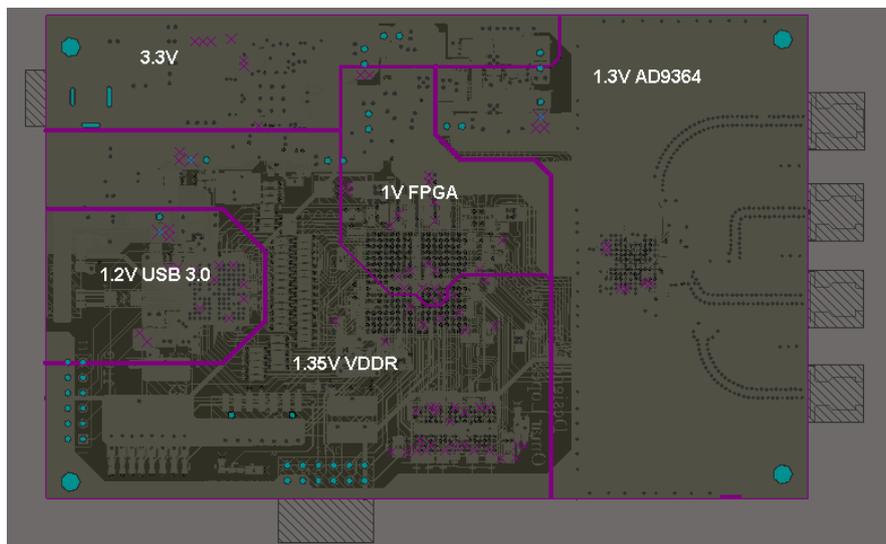


Figura 3-15: Plano1 de power

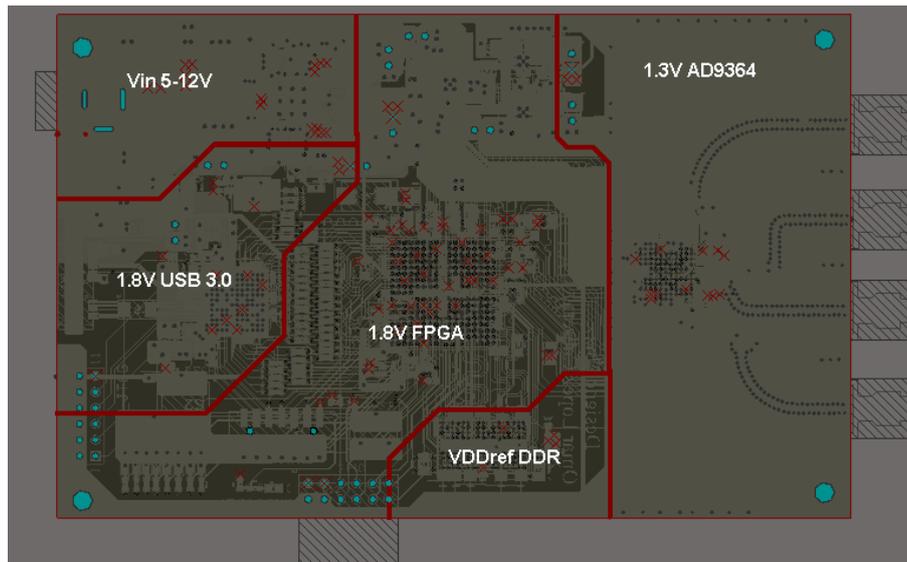


Figura 3-16: Plano2 de power

Una de las recomendaciones principales para los planos de tierra es que sean superficies de cobre ininterrumpidas que cubran toda la placa. En la siguiente figura se muestra dicho plano sólido.

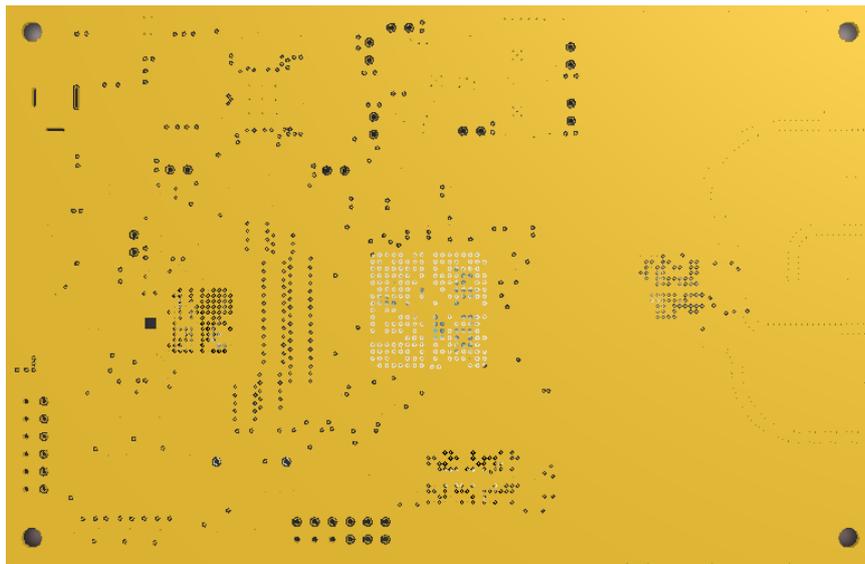


Figura 3-17: Plano solido GND

3.12 Capacitores desacople

Los capacitores de desacople funciona como un fuente de poder local muy chica para los circuitos integrados. Si el suministro de poder cae temporalmente en voltaje, estos capacitores pueden entregar voltaje durante un breve periodo de tiempo. Es por esto que estos capacitores también son llamados capacitores de bypass, ya que pueden temporalmente actuar como fuente de poder haciendo un bypass la fuente suministradora.

Todos los componentes cuentan con sus condensadores de desacoplo. En particular tanto en el controlador del USB 3.0 y el transceiver AD9364 los capacitores de desacople fueron seleccionados y colocado como en sus placas de desarrollo (por recomendación del fabricante).

Por otra parte, en el caso de la FPGA, Xilinx directamente recomienda la cantidad de condensadores de desacoplo que se deben proveer, incluso sugiere los fabricantes y modelos, ya que cumplen con requisitos de calidad en cuanto a ESR, ESL y degradación de la capacidad con el tiempo y la temperatura.

Lo más importante es que cada uno rango de valores de capacitancia son útiles en unos márgenes de frecuencia, influyendo a la distancia a la que se deben colocar de la FPGA. Por ejemplo los capacitores grandes actúan cuando el regulador de voltaje deja de funcionar en el rango de frecuencia baja.

Los capacitores grandes pueden ser ubicados en cualquier parte en los alrededores de la FPGA en cambio los pequeños deben ser colocados lo más cerca posible de los pines de alimentación. Esto es complicado para los integrados que tienen capsulado BGA pues hay una gran cantidad de vías justo debajo del chip y cuesta mucho ubicar todos los condensadores en sus lugares óptimos.

En la siguiente figura se muestra la parte posterior de la FPGA en donde se puede observar que los capacitores más pequeños ocupan el centro mientras que los más grandes los alrededores.

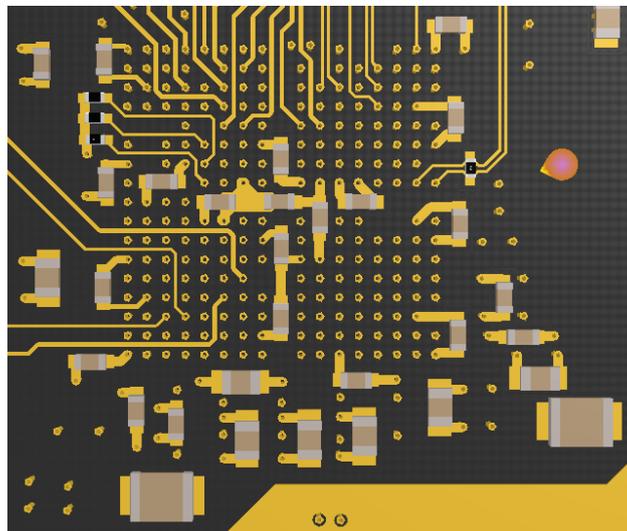


Figura 3-18: Ubicación capacitores desacople FPGA

3.13 Modelo 3D

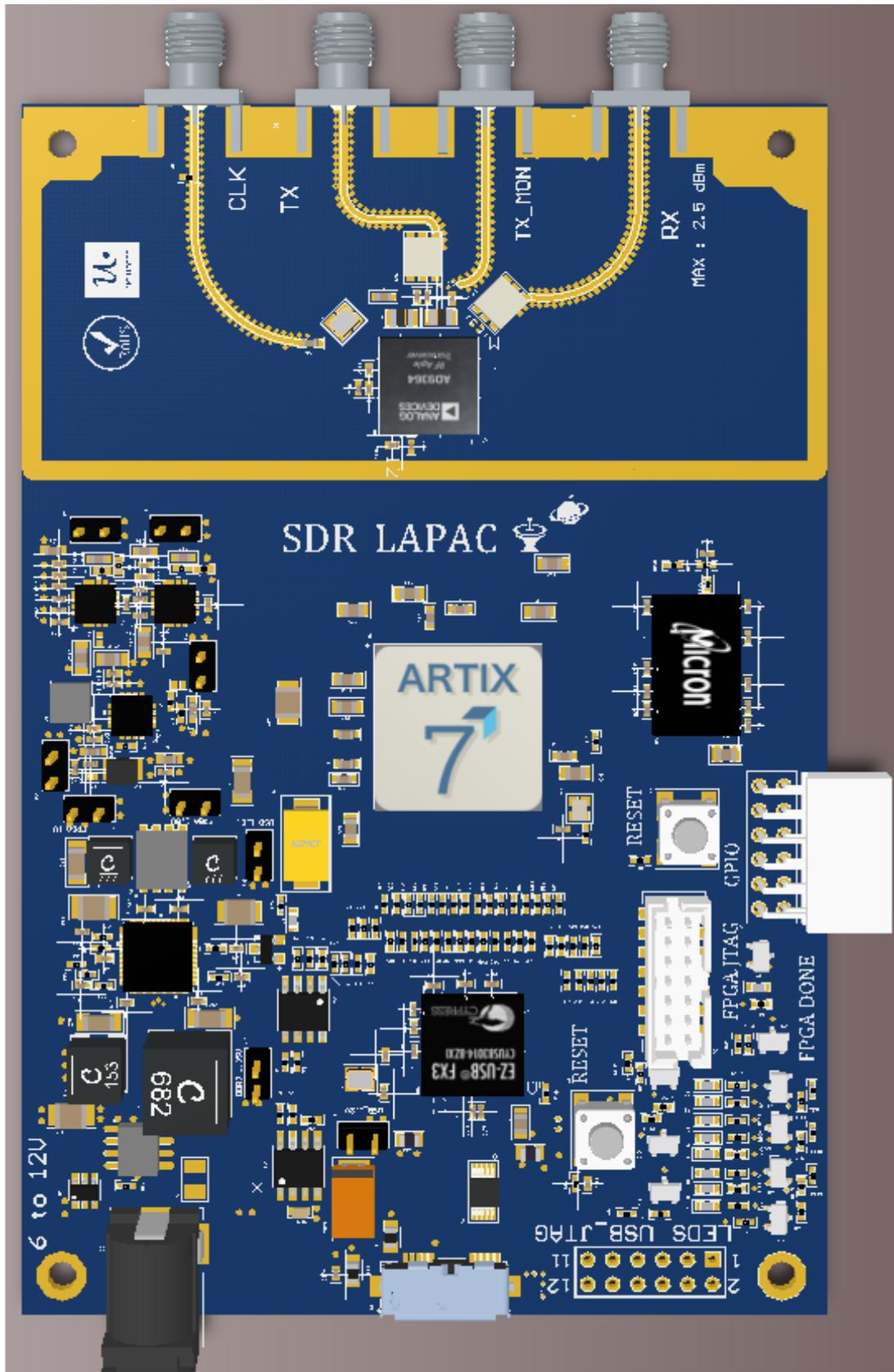


Figura 3-19: Modelo 3D placa, vista superior

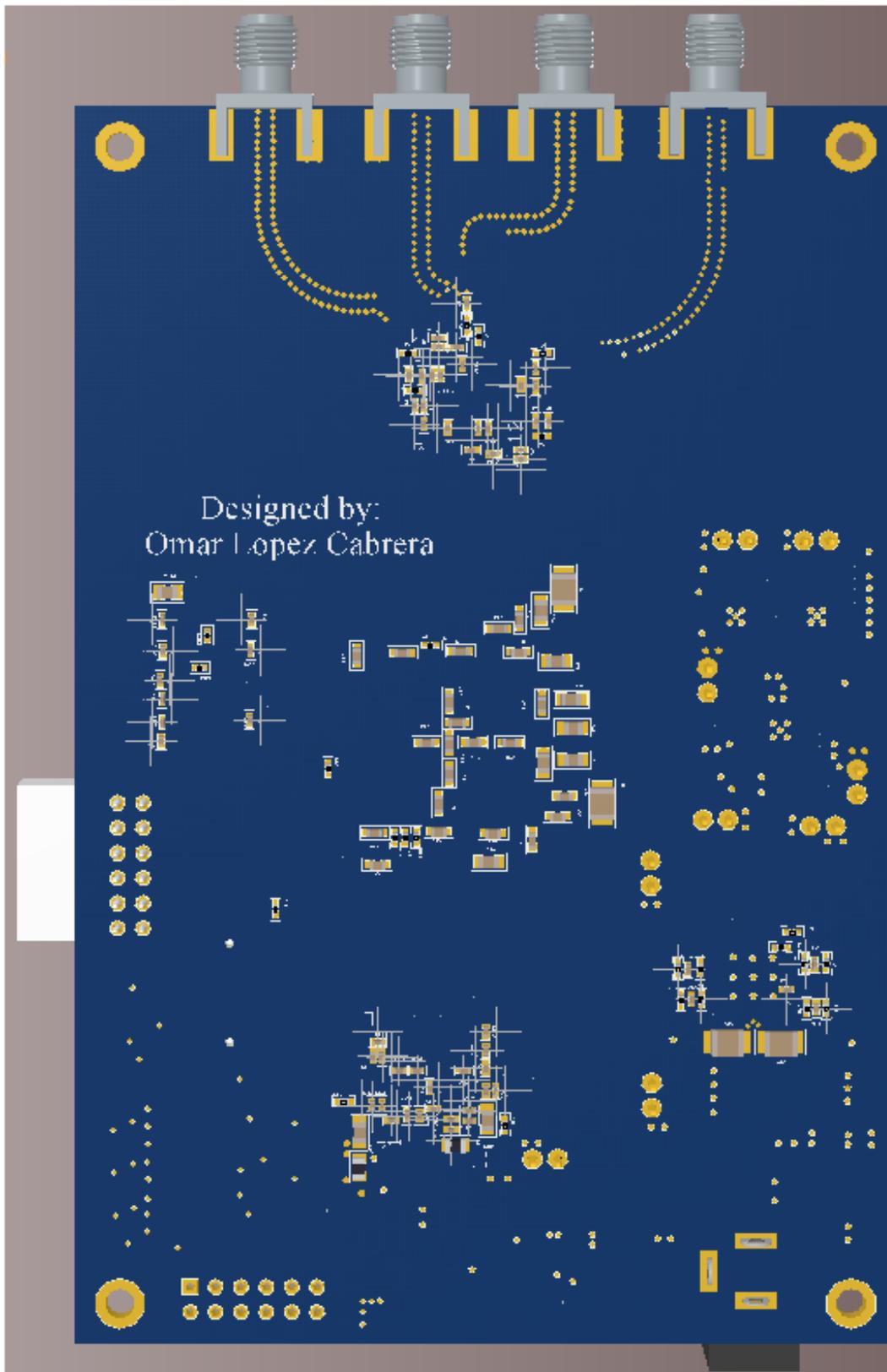


Figura 3-20: Modelo 3D placa, vista inferior

Capítulo 4

4. Sumario

4.1 Simulación de integridad de la señal

Por otra parte, en las etapas futuras del proyecto, sería interesante realizar simulaciones de integridad de la señal. Este tipo de simulaciones no son de carácter funcional sino de carácter físico. Actualmente los fabricantes proporcionan modelos de simulación de sus circuitos integrados en unos archivos llamados IBIS. Estos archivos contienen información de niveles de tensión y corriente en los pines de entrada y salida del chip, obtenidas de mediciones o de simulaciones del circuito.

Para realizar este tipo de simulaciones se pueden utilizar los siguientes programas:

- Mentor Graphics
- HyperLynx
- Cadence Design System

Dichos simuladores con estos archivos son capaz de simular cómo aparece un impulso eléctrico en un pin de salida, qué alteraciones sufre durante su recorrido por la placa y cómo es recibido en el pin del receptor.

4.2 Fabricación y ensamblado del PCB

Una vez terminadas las simulación y cumplidos los requerimientos por parte del fabricante, es momento de enviar el diseño a fabricación. Al tratarse de un primer prototipo por lo general se realizan una tirada pequeña de placas, lo cual aumenta el costo por placa.

Durante el desarrollo del proyecto se contactó con el fabricante “PCB Prototype” para pedir los datos necesarios para el diseño (datos sobre el stack up, costos y requerimientos de fabricación), por lo cual es recomendable realizar la fabricación con dicho proveedor.

La segunda operación a realizar es la compra de componentes. Si bien todos los componentes discretos y la mayoría de circuitos integrados están en permanente disponibilidad, algunos componentes más exclusivos como la FPGA o el transceiver pueden estar sujetos a fabricación bajo pedido o sin stock por lo tanto puede llevar a una demora en la recepción de varias semanas. Al tratarse de una gran cantidad de componentes se debió utilizar tres proveedores (Digikey, Mouser y Mini-Circuits) para cubrir la totalidad de los mismos.

Otras de la etapas del proyecto es la del ensamblado de la placa. El cual consiste en montar y soldar todos los componentes de la placa. El proceso más común consiste en utilizar un estencil (plantilla de metal con perforaciones, provisto por PCB Prototype) como mascara sobre el PCB para depositar la pasta de soldado. Luego los componentes se sueltan en su sitio de la placa

donde quedan sujetos por esta pasta aún semilíquida. Finalmente, el PCB se introduce en un horno especial con curvas de temperaturas controladas, produciéndose la soldadura dentro del mismo.

Debido a la gran cantidad de componentes y el uso de circuitos integrados en encapsulados BGA es recomendable que se contrate un servicio de ensamblado.

Toda la información necesaria para realizar la construcción del hardware se encuentra subido a un repositorio en github en el anexo 5.5.4

4.3 Software

Se debe realizar la programación y configuración de los diferentes módulos de la SDR para poder correr la aplicación deseada. Como así también la utilización de los diferentes drivers para la correcta interface entre la SDR y la PC. Se puede utilizar como ayuda la información detallada en la sección 2.3

4.4 Posibles Mejoras

- **Transceiver 2x2:** Para transformar esta SDR a una Multi Input Multi Output (MIMO), solo hay que cambiar el transceiver AD9364 por el AD9361. El AD9361 tiene el mismo encapsulado, pin out e interface digital que el AD9364 por lo que solo habría que modificar la parte de RF. Los sistemas MIMO son una parte importante de los estándares de comunicación Wireless modernos como por ejemplo: IEEE 802.11(Wi-Fi), 4G, 3GPP Long Term Evolution, WiMAX and HSPA+.
- **Posibilidad de boot dual de la FPGA:** Se puede agregar el hardware necesario para poder seleccionar el modo de boot de la FPGA (memoria Flash o vía USB) y selección del camino de datos adecuado. Realizando esta mejora la SDR puede llegar a operar de forma autónoma sin la necesidad de una PC para ciertas aplicaciones.
- **Balun y red de adaptación según rango de frecuencia:** La impedancia de los puertos de RF del transceiver varían según la frecuencia. Por este motivo es difícil obtener un ajuste óptimo de impedancia y performance para un amplio rango de frecuencia (70Mhz to 6Ghz). En particular el transceiver utilizado en este proyecto tienen 3 pares de puertos diferenciales para Rx (Rxa, Rxb, Rxc) y 2 pares para Tx (Txa, Txb). Se puede aprovechar esta cantidad de puertos para dividir el rango de frecuencia en varios más acotados. Utilizando un mejor balun y red de adaptación para cada rango de frecuencia [27]. Luego la salida de cada balun iría conectada a un selector de camino de RF, el cual a su vez se conectaría a la antena.

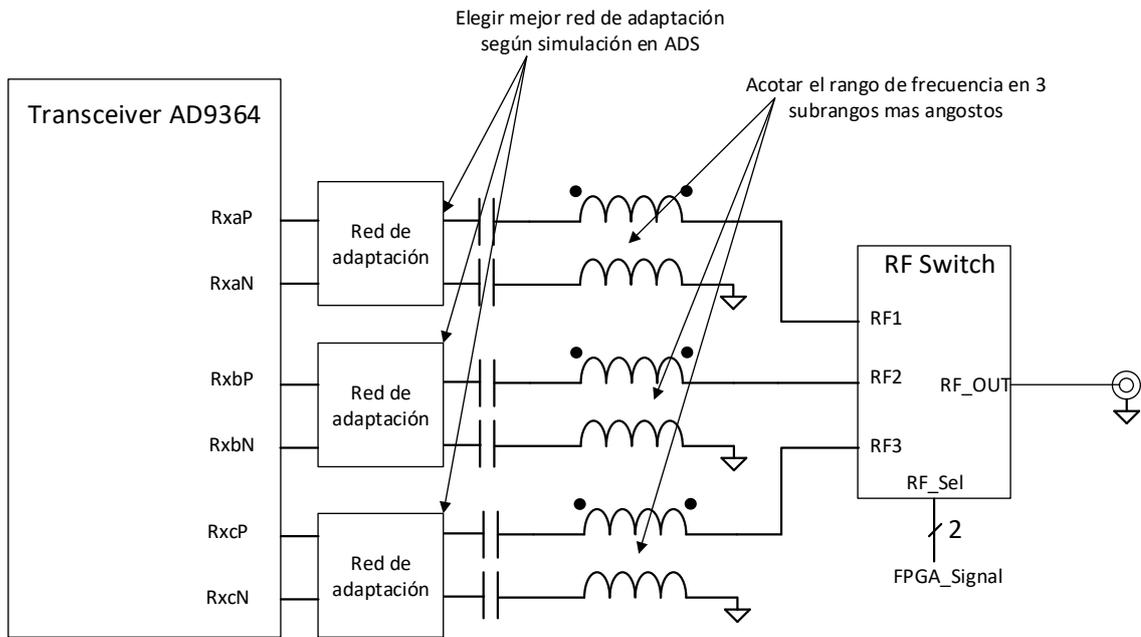


Figura 4-1: Diagrama de conexión, mejora etapa RF

5. Anexos

5.1. Hardware Design Guidelines

En esta sección se detallaran tablas que indican algunas de las recomendaciones en cuanto al diseño del PCB. Como así también la implementación en el Altium de algunas ellas.

Estas recomendaciones con respecto al PCB y otras con respecto al esquemático están disponibles en el [Anexo 5.5](#).

5.1.1. USB 3.0

Nº	Layout Design guide
1	Poner el cristal cerca del chip (menos de 2 cm)
2	Capacitores de desacople cercano al los pines de power del FX3
3	Rutear las pistas de las señales de clock lejos de las señales de alta velocidad
4	Rutear las pistas de power lejos de las señales de alta velocidad y las señales de clock
5	Capacitor del circuito de reset cerca del pin de reset
6	Las señales USB SS y USB HS deben tener impedancia de 90 ohms
7	Las señales USB SS y USB HS deben cumplir con el match length
8	Proveer un plano solido de GND de bajo de las señales de USB data
9	No utilizar Stubs en ninguna pista de USB
10	Proveer las pistas de USB SS con capacitores de desacople de 0.1 uF
11	No utilizar vias en las pistas de USB SS
12	No utilizar codos a 90 grados en las pistas de USB
13	Planos vacío debajo de los capacitores de acople AC
14	Asegurarse que ruteo de las pistas de SS y HS tengan un espaciado consistente
15	Ruteo de las lineas de USB lo mas cortas posible (<3 inches)

Tabla 5-1: Layout design guide para USB 3.0 controller

A continuación se mostrara la implementación de algunos de estos puntos (todos fueron implementados) en el PCB diseñado (recomendación/diseño):

- Por lo menos el plano inmediato debajo de los capacitores de AC coupling debe tener un corte con la forma de estos capacitores para evitar capacidades extras a causa de las capacidades de los pads.

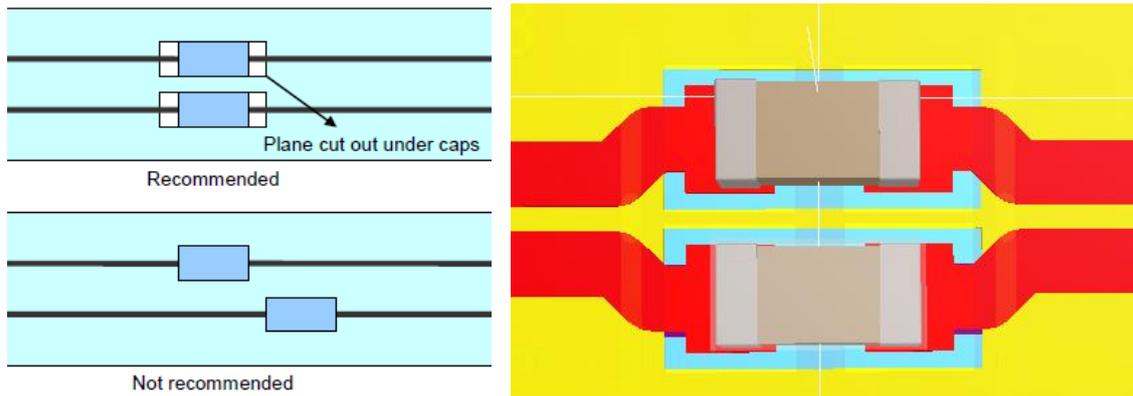


Figura 5-1: Recomendación ruteo capacitores en líneas SS del USB 3.0

- La siguiente figura muestra un ejemplo e implementación (CAD) del ruteo de las señales de USB desde el controlador hasta su conector. Las señales diferenciales mantienen una forma uniforme en todo el ruteo de las líneas. Los capacitores de AC coupling se encuentra cerca del controlador.

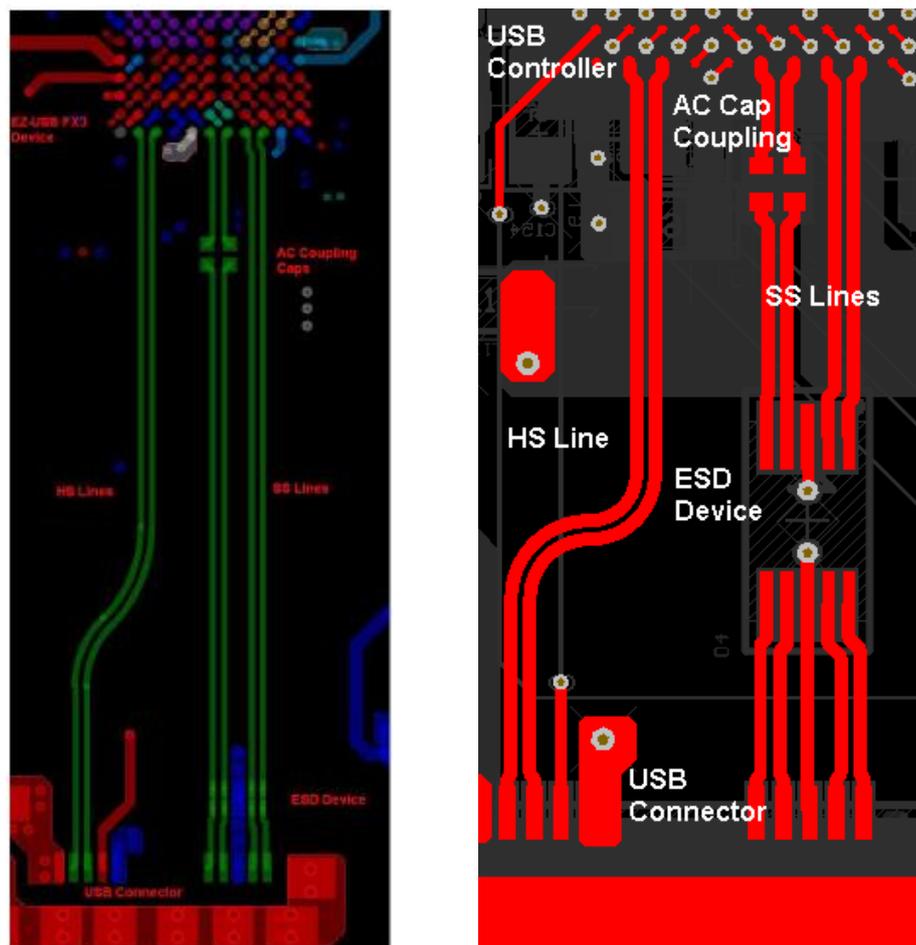


Figura 5-2: Recomendación ruteo líneas de USB3.0

5.1.2. FPGA

Nº	Xilinx FPGA Design guide
1	Realizar el layout del area del BGA de acuerdo a las recomendaciones
2	Realizar ruteo dentro del area del BGA de acuerdo a las recomendaciones
3	Estimacion de cantidad de capas PCB de acuerdo a formula de Xilinx
4	Colocacion de Capacitores cerca de la FPGA dependiendo tamaño
5	Utilizar land patern recomendados para los capacitores
6	Utilizar los capacitores recomendados por Xilinx dependiendo modelo de la FPGA
7	Alimentaciones de baja prioridad ubicarlas en la mitad inferior del stack up
8	Alimentaciones de alta prioridad ubicarlas en la mitad superior del stack up

Tabla 5-2: Layout design guide para FPGA

A continuación se mostrara la implementación de algunos de estos puntos (todos fueron implementados) en el PCB diseñado (recomendación/diseño):

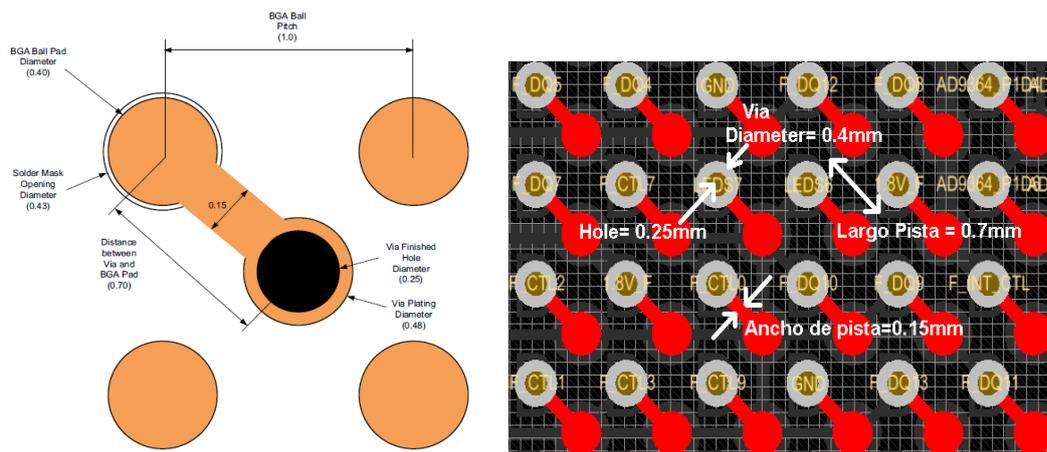


Figura 5-3: Fanout recomendado de la FPGA

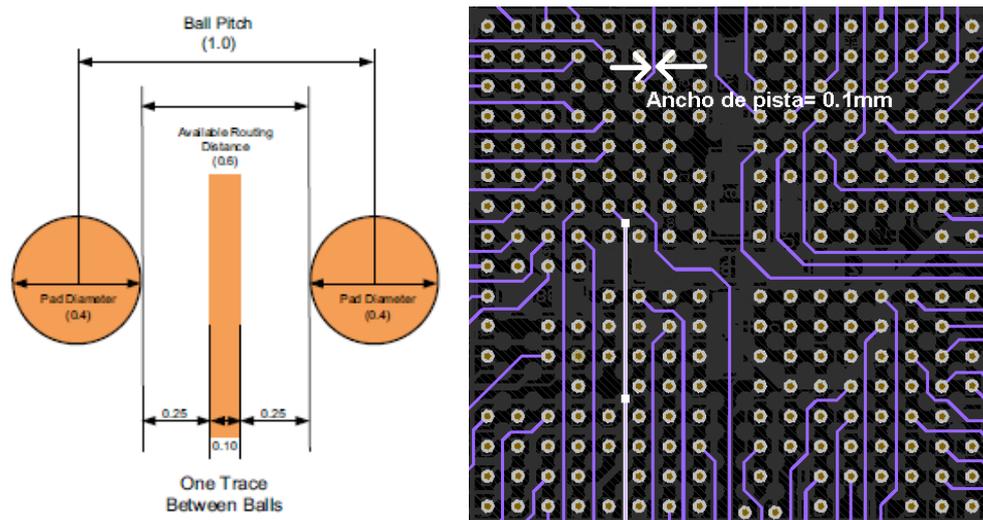


Figura 5-4: Recomendación ruteo BGA de la FPGA

5.1.3. Memory DDR3

En el caso de la memoria DDR3 hay requerimientos tanto por parte de Xilinx como de Micron.

Algunas recomendaciones de diseño por parte de Micron son las siguientes:

Nº	Micron DDR3 Design guide
1	Colocar capacitores de desacople según recomendaciones.
2	Rutear las líneas de datos, Address y control en diferentes capas, de no ser posible dejar un espacio mínimo entre grupos de 20 mils.
3	La máxima diferencia de largo entre las líneas de datos es de +/- 50 mils.
4	Utilizar ruteo en forma de "S" como patrón para incrementar el largo de pista.
5	Las líneas de clock CK y CK# deben ser ruteadas en la misma capa.
6	La máxima diferencia de largo entre las líneas CK y CK# es de +/- 20 mils.
7	La máxima diferencia entre las líneas de CK, Ck# y las líneas de datos es de +/- 500 mils.
8	El largo total de cada línea, desde la memoria hasta el controlador de la misma debe ser menor a 2 pulgadas.
9	Respetar el espaciado entre líneas de un mismo grupo y de diferentes grupos.
10	Las líneas de DDR3 single-ended tienen una impedancia de 50 Ohm.
11	Las líneas DDR3 Differential tienen una impedancia diferencial de 100 Ohm.

Tabla 5-3: Micron design guide para DDR3 memory

Algunas recomendaciones de diseño por parte de Xilinx son las siguientes:

Nº	Xilinx DDR3 Design guide
1	El máximo retraso eléctrico entre las señales DQ y sus DQS/DQS# asociados debe ser ± 5 ps.
2	El máximo retraso eléctrico entre cualquier señal de address o control y la señal de CK/CK# es de ± 25 ps.
3	El máximo retraso electrónico de cualquier DQS/DQS# debe ser menor que el de CK/CK#.
4	CK debe ser conectado a un par p-n en el byte de señales de control. Cualquier par p-m es aceptable incluidos SRCC, MRCC y DQS pins.
5	Las señales DQS para un grupo de byte deben ser conectadas a sus correspondientes pares de DQS del banco dedicado a conexiones de strobe para DDR3 SDRAM.
6	Las Señales DQ y DM deben ser conectadas a su grupo de byte asociado a su correspondiente DQS.
7	Todas las señales de address y control deben estar conectadas al mismo banco.
8	Las señales de control y address deben estar conectadas a un grupo de bytes en los cuales no haya señales de datos.
9	La señal RESET_N puede ser conectada en cualquier pin del banco.
10	Los pines de las señales pueden ser intercambiados dentro de su grupo de bytes libremente.
11	Los pines de las señales de control y address pueden ser intercambiadas libremente entre grupos de bytes
12	Las señales de CK/CK# deben llegar a la memoria después de las señales DQS/DQS#.
13	La impedancia diferencial de las pistas debe ser 80Ω para operar a 1333Mb/s o más. 100Ω es aceptable para tasas menores a 1333Mb/s.
14	La impedancia single ended de las pistas debe ser de 40Ω para una operación a 1333 Mb/s o más. 50Ω es aceptable para tasas menores a 1333Mb/s.

Tabla 5-4: Xilinx design guide para DDR3 memory

Data Group	Largo (mil)	Address&Control Group	Largo (mil)	Clock signal	Largo (mil)
DDR3_DM0	1351	DDR3_A11	1402	DDR3_CK_L_N	1.909
DDR3_DQ14	1351	DDR3_BA0	1404	DDR3_CK_L_P	1.904
DDR3_DM1	1353	DDR3_A9	1404		
DDR3_DQS0_N	1353	DDR3_A0	1406		
DDR3_DQS1_N	1355	DDR3_A13	1408		
DDR3_DQ8	1357	DDR3_A5	1409		
DDR3_DQ0	1358	DDR3_A12	1409		
DDR3_DQ2	1358	DDR3_A3	1411		
DDR3_DQ1	1360	DDR3_BA2	1411		
DDR3_DQS0_P	1361	DDR3_A2	1412		
DDR3_DQ11	1361	DDR3_A1	1413		
DDR3_DQ9	1363	DDR3_A10	1416		
DDR3_DQ7	1364	DDR3_A6	1417		
DDR3_DQ10	1364	DDR3_BA1	1421		
DDR3_DQ5	1365	DDR3_A8	1425		
DDR3_DQ13	1365	DDR3_A4	1425		
DDR3_DQ12	1365	DDR3_A7	1430		
DDR3_DQ15	1.365	DDR3_CKE	1.890		
DDR3_DQ6	1.365	DDR3_WE	1.899		
DDR3_DQS1_P	1.365	DDR3_ODT	1.901		
DDR3_DQ3	1.367	DDR3_CAS	1.902		
DDR3_DQ4	1.367	DDR3_RAS	1.906		
		DDR3_RESET	1.906		

Tabla 5-5: Largo ruteo señales DDR3

Para determinar cuanta distancia representan estos tiempos requeridos es necesario estimar la velocidad de propagación de las señales en las capas internas y externas del PCB.

En las capas externas (microstrip) la velocidad de propagación es:

$$v_p = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_{eff}}}$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{12d}{W}}}$$

En donde:

d = Altura del dieléctrico

W = Ancho del microstrip

Er = Constante dieléctrica.

Eeff = Constante dieléctrica efectiva

Vp= Velocidad de propagación.

C= Velocidad de la luz.

$$v_{p_ext} = \frac{3 \times 10^8 \frac{m}{seg}}{\sqrt{2.607}} = 1.85 \times 10^8 \frac{m}{seg}$$

En las capas internas (stripline) la velocidad de propagación es:

$$v_{p_int} = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{3 \times 10^8 \frac{m}{seg}}{\sqrt{4.6}} = 1.398 \times 10^8 \frac{m}{seg}$$

A continuación se realizara un análisis de los tiempos de cada señal de acuerdo a las recomendaciones de Xilinx:

- El máximo retraso eléctrico entre las señales DQ y sus DQS/DQS# asociados debe ser ± 5 ps:
Las señales de DQS y DQ están ruteadas bajo las mismas condiciones (largo de vías, capa en donde están ruteadas, etc.), por lo que se puede ver este requerimiento de tiempo como una diferencia de largo.

Máxima diferencia de largo entre DQS y DQ:

$$Max_{Diff} = v_{p_int} \times 5ps = 1.398 \times 10^8 \frac{m}{seg} \times 5 \times 10^{-12} seg = 27.5mil$$

La máxima diferencia entre todas las líneas de datos es de 16 mil por lo cual se cumple este requerimiento.

- El máximo retraso eléctrico entre cualquier señal de address o control y la señal de CK/CK# es de ± 25 ps:

Como estas señales viajan por diferentes capas hay que realizar un análisis de tiempo, analizando el retraso de las vías, longitudes y diferentes velocidades de propagación. La siguiente figura muestra la información sobre la distribución de estas señales en las diferentes capas:

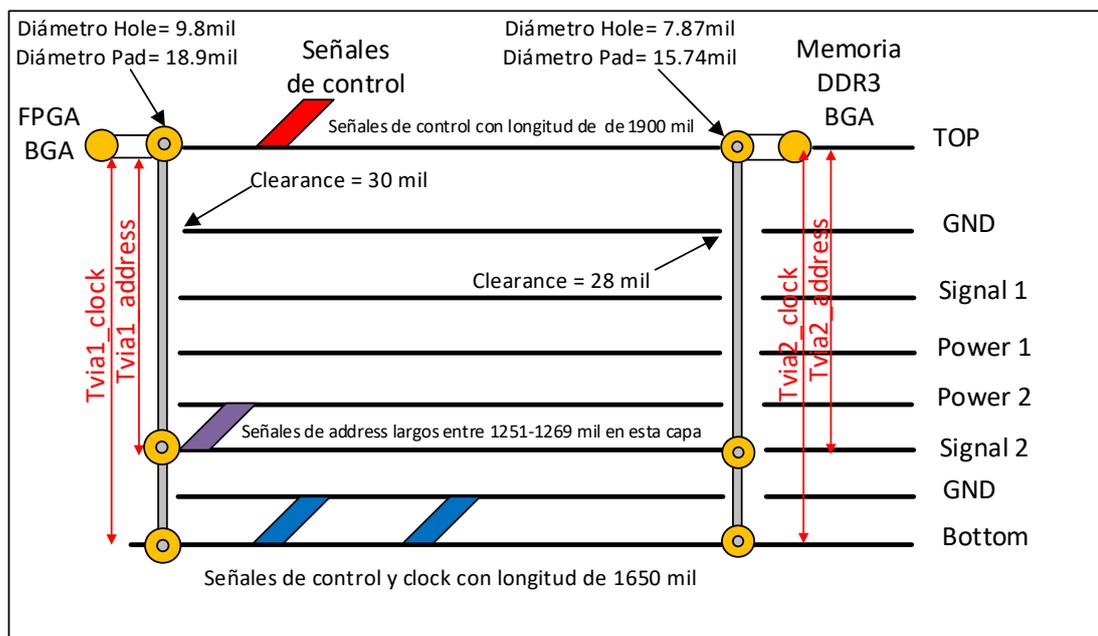


Figura 5-5: Distribución señales memoria DDR3

En el caso de la capa superior:

$$t_{ControlSignalTop} = \frac{Largo}{v_{p_ext}} = \frac{1900 \text{ mil}}{1.85 \times 10^8 \frac{m}{seg}} = 260.86 \text{ ps}$$

En el caso de las otras dos capas es necesario estimar el tiempo de retardo producido por las vías.

$$t_{via} = \sqrt{L_{via} C_{via}}$$

El cálculo de la capacidad parasita de la vía viene dado por:

$$C_{via} = \frac{1.41 \times \epsilon_r \times T \times D_1}{D_2 - D_1}$$

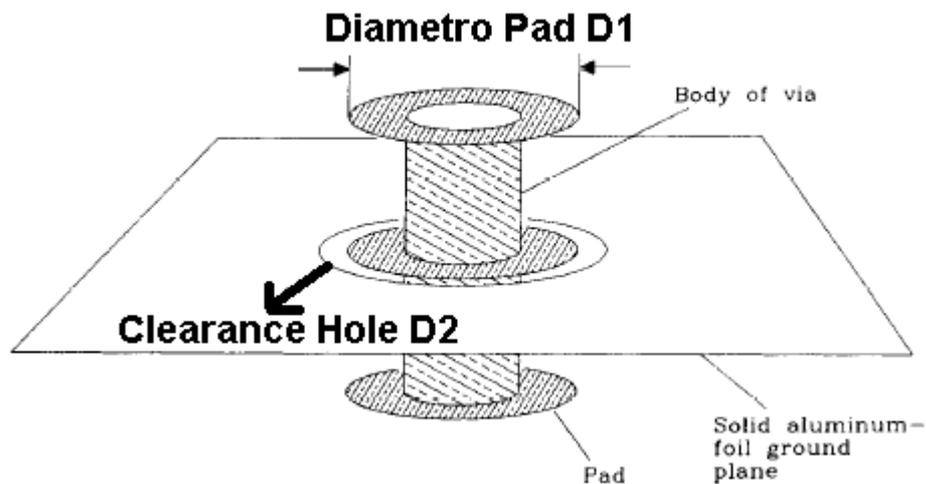


Figura 5-6: Modelo de vía

En donde cada término representa:

C_{via} = Capacidad parasita de la vía [pF].

ϵ_r = Constante dieléctrica.

T = Espesor de la placa [pulgadas].

$D1$ = Diámetro del pad de la vía [pulgadas].

$D2$ = Diámetro de espaciado (clearance) de despeje en los planos de GND [pulgadas].

$$L_{via} = 5.08 \times h \times \left[\ln \left(\frac{4h}{d} \right) + 1 \right]$$

En donde cada término representa:

L_{via} = Inductancia de la vía [nH]

h = Largo de la vía [pulgadas]

d = Diámetro de la vía [pulgadas]

Análisis tiempo señales address capa intermedia:

$$C_{via1_address} = \frac{1.41 \times 4.6 \times 0.062 \times 0.0189}{0.02} = 0.38 \text{ pF}$$

$$L_{via1_address} = 5.08 \times 0.046 \times \left[\ln \left(\frac{4 \times 0.046}{0.0189} \right) + 1 \right] = 0.765 \text{ nH}$$

$$t_{via1_address} = \sqrt{0.38 \text{ pF} \times 0.765 \text{ nH}} = 17.05 \text{ pseg}$$

$$C_{via2_address} = \frac{1.41 \times 4.6 \times 0.062 \times 0.0157}{0.02} = 0.315 \text{ pF}$$

$$L_{via2_address} = 5.08 \times 0.046 \times \left[\ln \left(\frac{4 \times 0.046}{0.0157} \right) + 1 \right] = 0.808 \text{ nH}$$

$$t_{via2_address} = \sqrt{0.315 \text{ pF} \times 0.808 \text{ nH}} = 15.95 \text{ pseg}$$

$$t_{AddressSignalMidLayer} = \frac{Largo}{v_{p_int}} = \frac{1269 \text{ mil}}{1.398 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{seg}}} = 230.32 \text{ pseg}$$

$$t_{totalSignalAddress} = t_{via1_address} + t_{AddressSignalMidLayer} + t_{via2_address} = 263.32 \text{ ps}$$

Análisis tiempo señales address capa bottom:

$$C_{via1_clock} = \frac{1.41 \times 4.6 \times 0.062 \times 0.0189}{0.02} = 0.38 \text{ pF}$$

$$L_{via1_clock} = 5.08 \times 0.062 \times \left[\ln \left(\frac{4 \times 0.062}{0.0189} \right) + 1 \right] = 1.108 \text{ nH}$$

$$t_{via1_clock} = \sqrt{0.38 \text{ pF} \times 1.108 \text{ nH}} = 20.51 \text{ pseg}$$

$$C_{via2_clock} = \frac{1.41 \times 4.6 \times 0.062 \times 0.0157}{0.02} = 0.315 \text{ pF}$$

$$L_{via2_clock} = 5.08 \times 0.062 \times \left[\ln \left(\frac{4 \times 0.062}{0.0157} \right) + 1 \right] = 1.184 \text{ nH}$$

$$t_{via2_clock} = \sqrt{0.315pF \times 1.184nH} = 19.31 \text{ pseg}$$

$$t_{ClockSignalBottom} = \frac{Largo}{v_{p_ext}} = \frac{1650 \text{ mil}}{1.85 \times 10^8 \frac{m}{seg}} = 226.54 \text{ pseg}$$

$$t_{totalSignalClock} = t_{via1_clock} + t_{Control\&clockSignalBottom} + t_{via2_clock} = 266.36ps$$

Se puede ver que estos tiempos están dentro de los 25ps requeridos.

Estos cálculos deben ser constatados en el futuro con simulaciones de integridad de señal (simulación con modelos IBIS).

A continuación se mostrara la aplicación de algunos de estos puntos (todos fueron implementados) en el PCB diseñado:

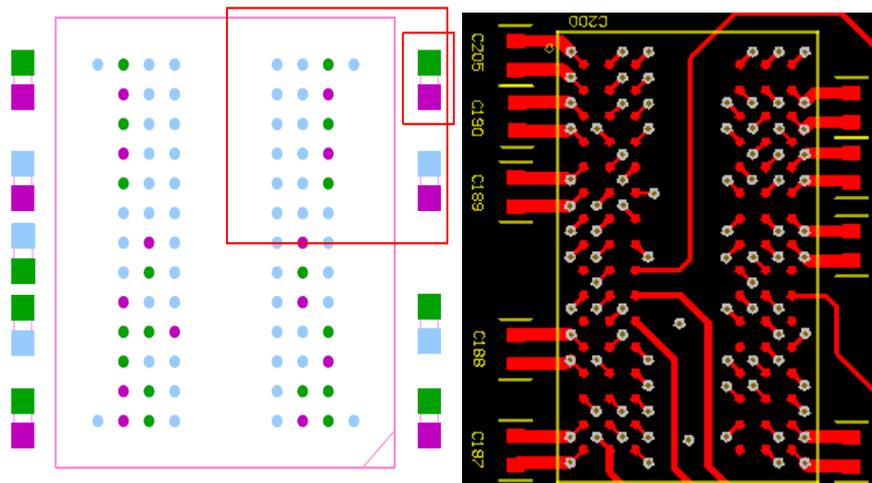


Figura 5-7: Recomendación ubicación capacitores desacople de la memoria DDR3

Ajuste de largo de pista utilizando ruteo en forma de "S", ruteo en diferentes capas:

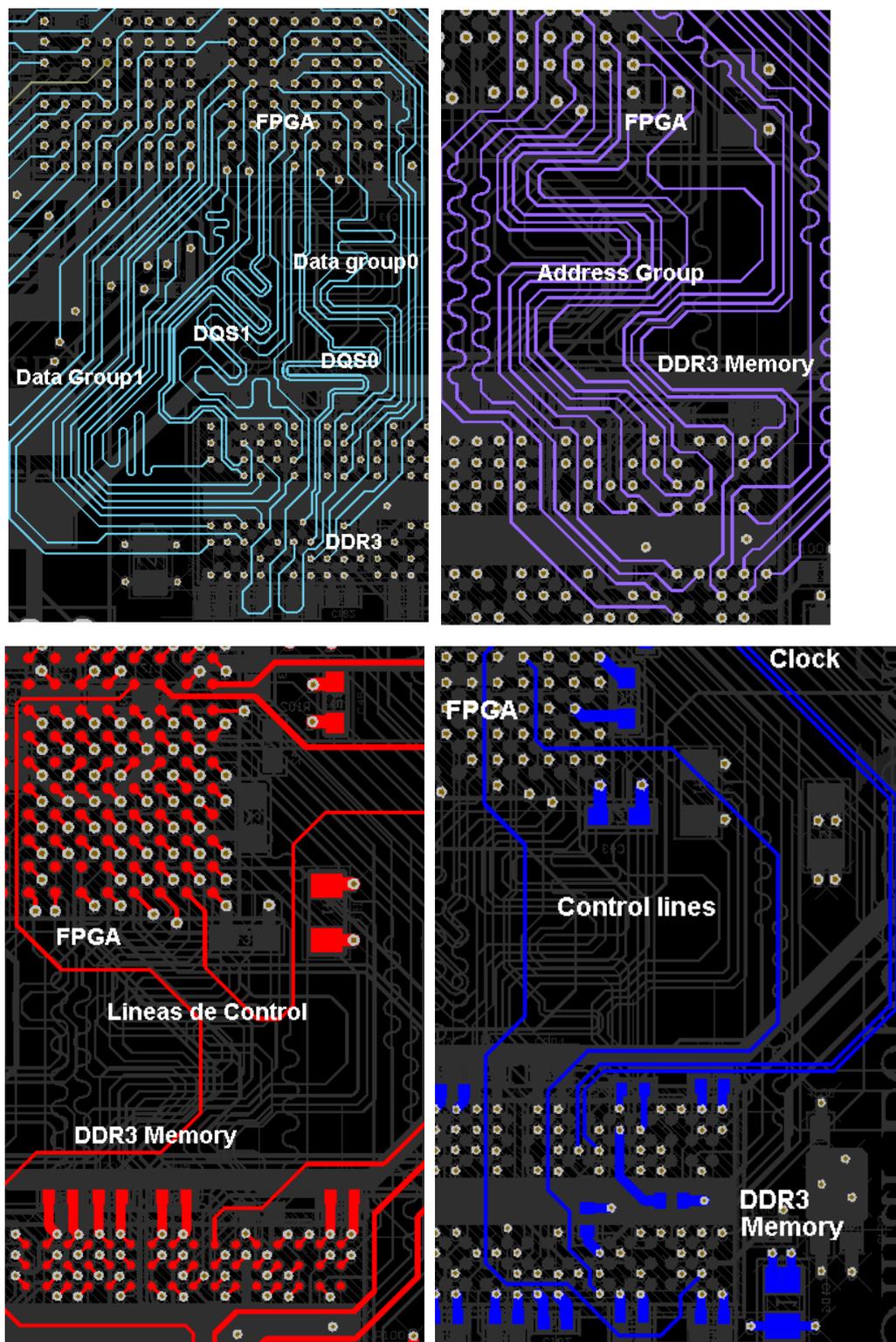


Figura 5-8: Ruteo líneas de memoria DDR3

5.1.4. Transceiver AD9364

Nº	Layout Design guide
1	Realizar el layout del área del BGA de acuerdo a las recomendaciones.
2	La segunda layer y el ante último deben ser planos de GND sólidos sin divisiones, esto es fundamental para asegurar la integridad de RF y la performance del integrado.
3	Las señales de RF de Rx y Tx deben ser ruteadas en el top sin la utilización de vías.
4	El ruteo de las pistas de Rx y Tx hasta el balun deben ser lo más cortas posibles.
5	El ruteo de la interface digital debe realizarse en las capas internas del PCB.
6	La impedancia de las líneas de la interface digital debe ser de 50 Ohm.
7	Deben utilizarse microstrip líneas para el ruteo de las señales de RF.
8	Los planos de GND deben ser ruteados hasta los bordes del PCB debajo del conector SMA para mantener la integridad de señal.
9	Mantener alejadas las señales de RF de las señales digitales de alta velocidad.
10	Colocar capacitores de bypass cerca de sus respectivos pines

Tabla 5-6: Layout design guide para Transceiver AD9364

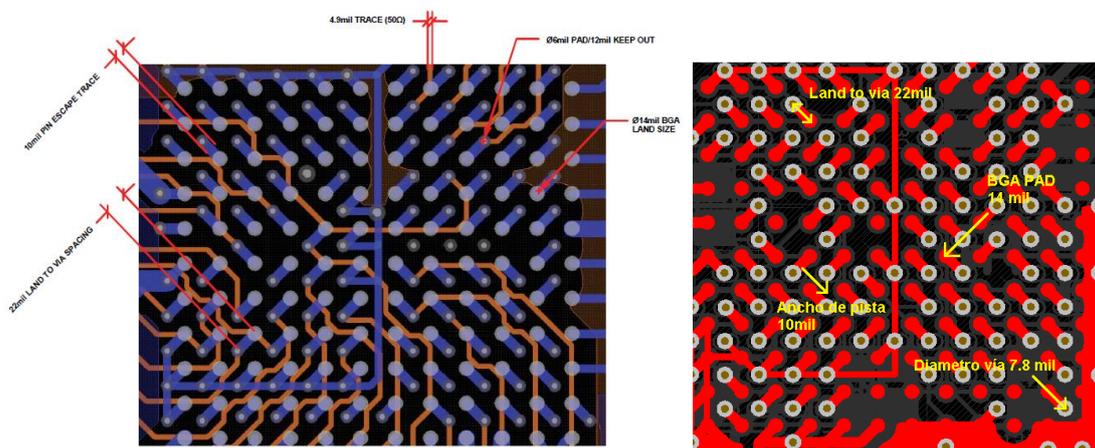


Figura 5-9: Fanout recomendado para el AD9364

Las otras recomendaciones son mostradas a lo largo de la tesis.

5.2. Cuestiones generales del diseño

5.2.1. Alimentación

Vías para escape térmico

Las vías térmicas son agujeros mecánicos que atraviesan toda la placa. Estas vías son idealmente colocadas directamente bajo los componentes de montaje superficial que disipan mucho calor. Este método hace que el calor que fluye a través de las vías sea disipado en los planos sólidos de GND.

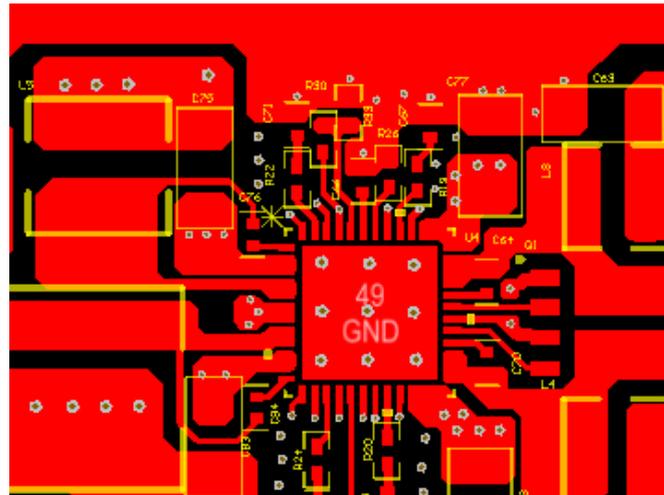


Figura 5-10: Vías de escape térmico.

Header para test por etapa

La alimentación de cada sección está separada por un header, de esta manera se puede ir probando cada sección por separado. Una vez probado el correcto funcionamiento de todas las etapas, estos headers pueden ser reemplazados por resistencias de 0 Ohm.

En la siguiente figura se puede ver dichos headers tanto en el modelo 3D como en el esquemático.

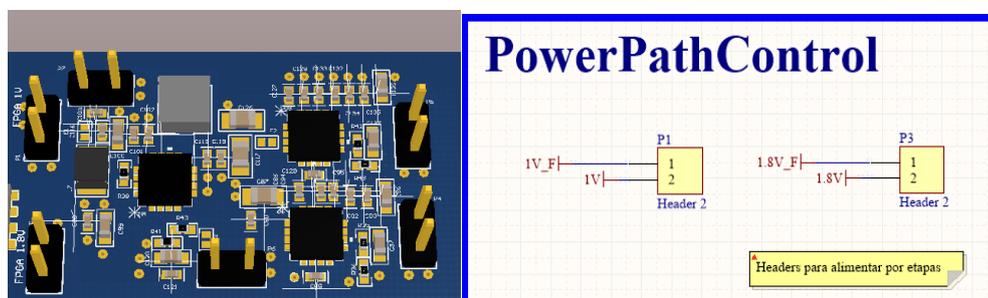


Figura 5-11: Headers para el control de la alimentación por etapas

5.2.2. AD9364

Shielding sección RF

Se añadió la opción de poder aislar la sección de RF del transceiver AD9364 mediante la utilización de una jaula. La misma irá soldada sobre la parte expuesta de cobre, la cual tiene vías a GND.

La siguiente figura muestra dicha sección:

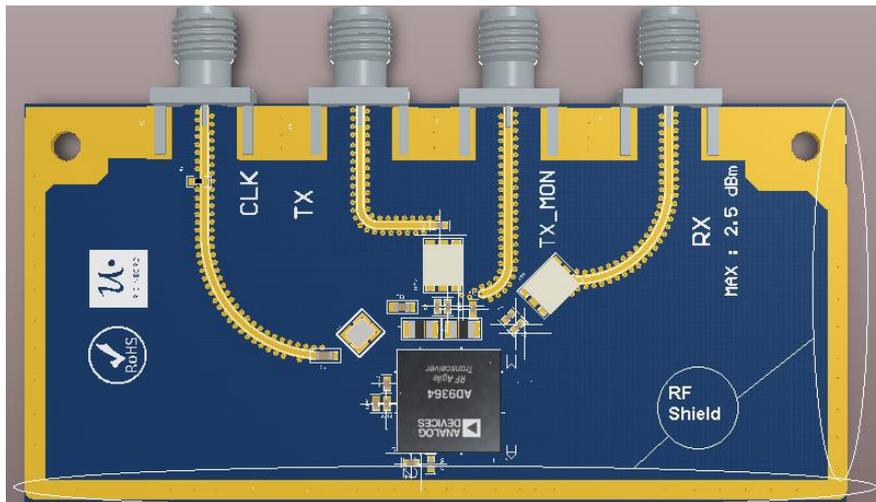


Figura 5-12: Shielding sección de RF

Interface entre el transceiver y las antenas

Sección Rx

Los amplificadores de bajo ruido en los puertos de Rx (Rxa, Rxb, Rxc) son funcionales en el rango de frecuencia de 70 MHz – 6 GHz. Cuando estos operan por debajo de los 3 GHz, todos los puertos de entrada de los LNA proveen una performance óptima. Cuando la frecuencia de operación está por encima de los 3GHz es conveniente utilizar los puertos de entrada Rxa y Rxb para una performance óptima. Estos tres puertos son diferenciales pero también pueden ser configurados como single ended. La recomendación por parte del fabricante es utilizarlos en modo diferencial para lograr la mejor performance en: figura de ruido y punto de intersección de segundo orden (IP2). El máximo nivel de entrada es de +2.5 dBm de pico (single ended, ideal match, 50 ohm source). La siguiente figura muestra las posibles configuraciones single ended y diferenciales para la interface:

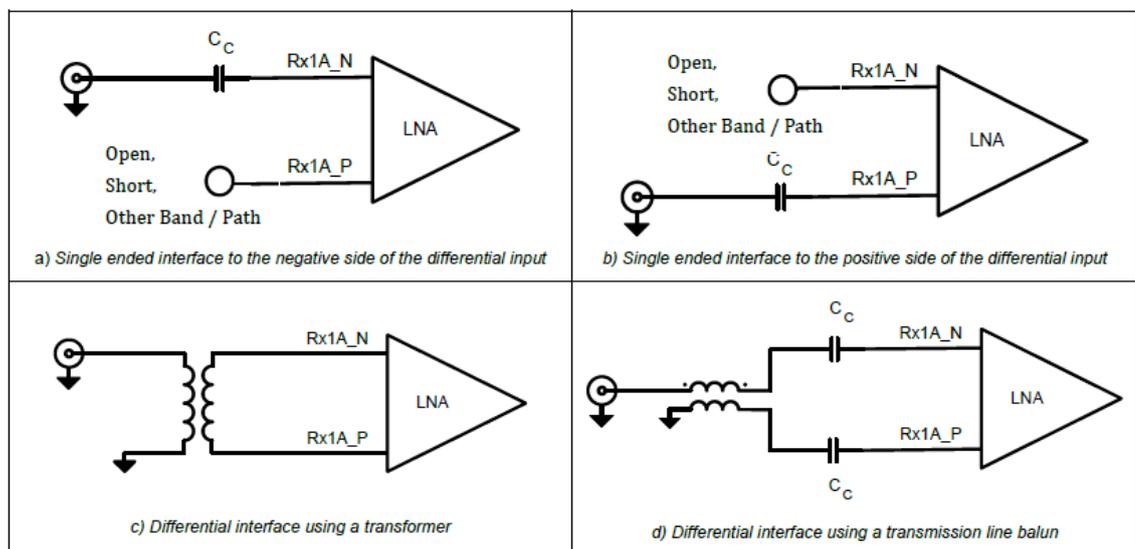


Figura 5-13: Esquemas de interface transceiver-antena para Rx.

De las dos opciones con interface diferencial se decidió implementar la opción “D”, la cual es utilizada en la placa de desarrollo de Analog Devices (modelo de referencia).

Sección Tx

El camino de transmisión cubre todo el rango de frecuencia desde 70 MHz hasta 6 GHz, mediante 2 puertos de salida Tx los cuales tienen una performance similar. Estos puertos de salida son diferenciales y requieren una polarización externa. Esta polarización externa requiere un voltaje de 1.3V DC utilizando como conexión un inductor de choque (wire-wound inductor).

Para determinar los componentes y la topología a utilizar se tuvieron en cuenta las siguientes recomendaciones por parte del fabricante:

- La inductancia de choque debe ser elegida de tal manera que su impedancia sea alta en comparación con la impedancia de carga, para que no afecte la respuesta en frecuencia.
- Las salidas de Tx deben estar acopladas en AC debido a la presencia del voltaje de polarización de 1.3V DC.
- Una red de adaptación, balun single-ended port, es la mejor para conseguir una performance óptima.
- Utilización de componentes con baja resistencia DC para minimizar la caída de tensión debida a resistencias en serie parasitas.

La siguiente figura muestra las posibles configuraciones single ended y diferenciales para la interface:

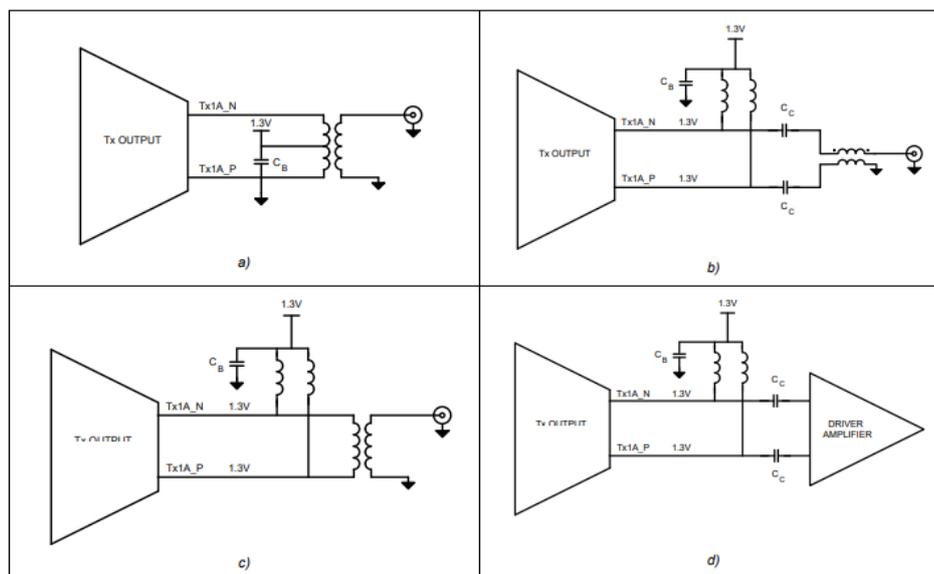


Figura 5-14: Esquemas interface transceiver-antena en Tx.

En base a las recomendaciones del fabricante, de las dos opciones que utilizan balun se decidió implementar la opción “b”.

Redes de adaptación del transceiver

Adaptación Rx

La impedancia de los puertos de RF Rx del transceiver varía según la frecuencia como se muestra en la siguiente figura:

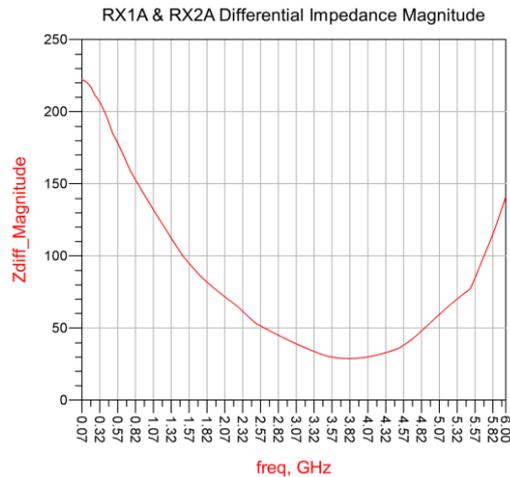


Figura 5-15: Impedancia variable con la frecuencia en los puertos de Rx.

Por este motivo la interconexión entre estos puertos y el balun se realizaron según el FAQ “AD9361 RF Port Interface” [25] (este FAQ es válido para el AD9364).

Esta guía establece las siguientes recomendaciones cuando se trabaja en un ancho de banda grande (70 MHz to 6 GHz):

- Conexiones lo más cortas posibles.
- Impedancia diferencial Rx de 100 Ohm.
- Utilizar Balun (1:N, $Z_0 = 50$ Ohm). Se utilizó el balun TCM1-63AX+ de mini-circuits (el cual es utilizado en la placa de desarrollo del AD9364)

En la siguiente figura se muestra la aplicación de estas recomendaciones en el ruteo del PCB:



Figura 5-16: Ruteo sección de RF transceiver AD9364

Para realizar la interconexión entre el balun y el conector SMA se utilizó una coplanar waveguide Grounded (CPWG) en lugar de una microstrip.

Las coplanar waveguide tienen las siguientes cualidades en comparación a las microstrip line:

- Más simples de fabricar (menos cobre a eliminar cuando se realiza el printed circuit).
- Reducción de pérdida por radiación.
- Reducción de cross talk (campos eléctricos y magnéticos confinados).

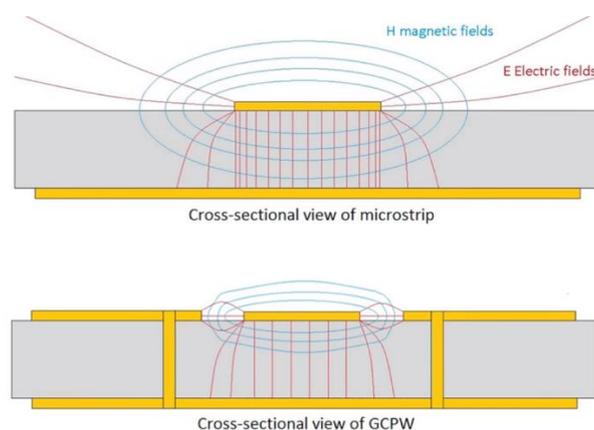


Figura 5-17: Campos eléctricos y magnéticos en una CPWG.

El cálculo de impedancia de la CPWG se encuentra en el [Anexo 5.3.6](#). Para más información ver sobre CPWG [28]

Además se ajustó de stackup y ancho de pista 50 Ohm RF para tener mismo ancho que el pin del conector SMA. Reduciendo la desadaptación de impedancia al pasar del PCB al conector.

Para determinar si la distancia de conexión entre el transceiver y el balun (132 mil) es corta se realizó un análisis de cuanta distancia en Lambda esta conexión representa, para las diferentes frecuencias.

Para calcular Lambda (longitud de onda) se realizó la siguiente cuenta:

$$\lambda = \frac{v_{p_ext}}{f}$$

Frecuencia[GHz]	Lambda[mm]	Lambda[mil]	Distancia de 132 mil en lambdas
1	185	7283,45	0,018
2	92,5	3641,73	0,036
3	61,6	2425,19	0,054
4	46,25	1820,86	0,072
5	37	1456,69	0,091
6	30,83	1213,78	0,109

Tabla 5-7: Análisis distancia transceiver-balun en sección de RF.

A partir de estos cálculos se puede determinar que la distancia es corta. Además se puede ver que a medida que se aumenta la frecuencia la distancia aumenta su valor en lambdas. Por lo tanto en las altas frecuencias una desadaptación de impedancia tiene más peso que en las bajas frecuencias.

Este puede ser uno de los motivos por el cual se recomienda utilizar una impedancia diferencial de 100 Ohm, ya que en las altas frecuencias la impedancia diferencial en los puertos de RF es cercana a los 100 Ohm.

Se realizó una simulación de RF de la sección de Rx en el ADS para ver cuán adaptado esta la antena al transceiver en el rango de frecuencia de 70 MHz a 6 GHz [Anexo 5.4].

De forma similar se realizó el ruteo de la sección de Tx tomando como referencia el FAQ y la placa de desarrollo del AD9364. Para el caso de Tx no se pudo realizar simulaciones ya que el fabricante no provee los parámetros S para los puertos de transmisión.

Criterio de interface digital transceiver

En particular este dispositivo no impone explícitamente requerimientos en cuanto a la máxima diferencia de largo entre cada línea de su interface digital con el BBP. En su lugar da restricciones en cuanto a tiempos en el camino de datos como muestran las siguientes figuras:

Parameter	Min	Typical	Max	Description
t_{CP}	16.276 ns			DATA_CLK cycle time (clock period)
t_{MP}	45% of t_{CP}		55% of t_{CP}	DATA_CLK and FB_CLK high and/or low minimum pulse width (including effects of duty cycle distortion, period jitter, cycle-cycle jitter and half-period jitter)
t_{SC}	1 ns			Control signal setup time to FB_CLK at AD9364 inputs (ENABLE, TXNRX)
t_{HC}	0 ns			Control signal hold time from FB_CLK at AD9364 inputs (ENABLE, TXNRX)
t_{STX}	1 ns			Tx data setup time to FB_CLK at AD9364 inputs
t_{HTX}	0 ns			Tx data hold time from FB_CLK at AD9364 inputs
t_{DDRx}	0 ns		1.5 ns	Rx data delay from DATA_CLK to D[11:0] outputs – 1.8 V supply
			1.2 ns	Rx data delay from DATA_CLK to D[11:0] outputs – 2.5 V supply
t_{DDV}	0 ns		1.0 ns	Rx data delay from DATA_CLK to Rx_FRAME
t_{ENPW}	t_{CP}			ENABLE pulse width (edge-detected by FB_CLK)
$t_{TXNRXPW}$	t_{CP}			TXNRX pulse width (edge-detected by FB_CLK)
$t_{TXNRXSU}$	0 ns			TXNRX setup time to ENABLE
t_{RPRE}	$2 \times t_{CP}$			Time at which BBP stops driving D[11:0] before a receive burst, TDD
t_{RPST}	$2 \times t_{CP}$			Time at which BBP starts driving D[11:0] after a receive burst, TDD

Tabla 5-8: Restricción de tiempos interface digital transceiver-FPGA

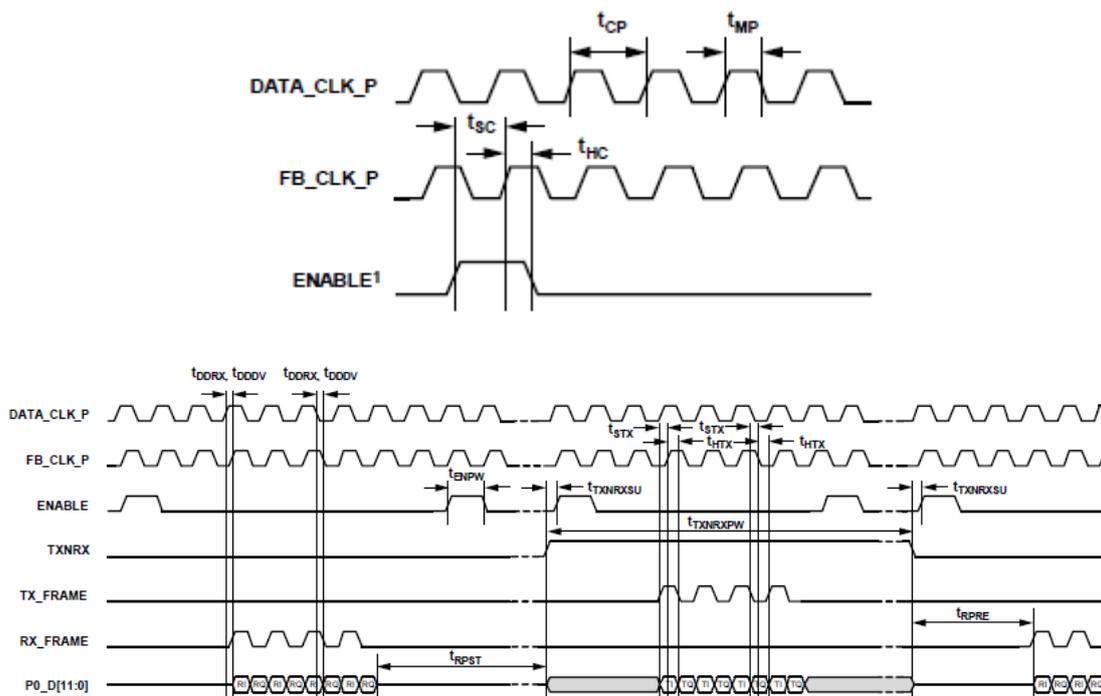


Figura 5-18: Diagrama de tiempos de señales interface digital transceiver-FPGA

En lugar de realizar cálculos de cuanto es la velocidad de propagación de las señales dentro de la placa y cuanta distancia representa estos tiempos. Se optó por ajustar a “cero” (unos pocos mils) la diferencia de largo de estas líneas. La siguiente tabla muestra el ajuste de largo de estas señales:

Data P0	Largo (mil)	Data P1	Largo (mil)	Other signals	Largo (mil)
AD9364_P0D8	3001	AD9364_P1D4	3005	ENABLE_AD9364	3001
AD9364_P0D2	3002	AD9364_P1D8	3005	F_FB_CLK	3001
AD9364_P0D11	3003	AD9364_P1D10	3009	DATA_CLK	3001
AD9364_P0D1	3003	AD9364_P1D9	3009	TXNRX	3005
AD9364_P0D7	3005	AD9364_P1D1	3010		
AD9364_P0D10	3006	AD9364_P1D3	3010		
AD9364_P0D6	3007	AD9364_P1D2	3011		
AD9364_P0D4	3008	AD9364_P1D7	3011		
AD9364_P0D3	3009	AD9364_P1D5	3012		
AD9364_P0D0	3009	AD9364_P1D11	3013		
AD9364_P0D9	3010	AD9364_P1D0	3014		
AD9364_P0D5	3010	AD9364_P1D6	3016		

Tabla 5-9: Ajuste largo señales digitales AD9364

5.3. Herramientas utilizadas durante el diseño.

5.3.1. Estimación consumo FPGA

Para estimar el consumo de la FPGA se utilizó la herramienta “Xilinx® Power Estimator (XPE)”. Esta herramienta considera los recursos utilizados en el diseño, como por ejemplo: toggle rates, I/O loading y otros factores que combinados son utilizados para estimar la distribución de power.

La estimación de power para dispositivos programables es un proceso complejo porque depende en gran medida de la cantidad de lógica en el diseño y la configuración de la misma.

Para estimar este consumo, esta herramienta pide como mínimo los siguientes parámetros de entrada:

- Dispositivo, encapsulado y grado de velocidad.
- Cantidad de recursos utilizados (flip-flops, look-up tables. Block RAM, etc.).
- Frecuencia de clock.
- Una estimación del data toggle rate.
- Uso de memoria externa.
- Temperatura del medio en el que va a operar

Toggle rate

Obtener un toggle rate preciso es esencial para que la estimación de power sea correcta. Esta información no está disponible en esta etapa del diseño ya que depende de la lógica programada y el funcionamiento de la misma. Para estimar este valor Xilinx da como guía los siguientes puntos a tener en cuenta:

- Para un camino sincrónico, el toggle rate refleja que tan seguidas las salidas cambian con respecto al clock de entrada. Este cambio es modelado de forma porcentual entre 0-100% (200% para DDR). Un máximo de toggle rate en los datos significa que la salida cambia en cada flanco ascendente de clock.

- Para señales no periódicas, el toggle rate no es fácil de predecir. Un método efectivo para estimar el promedio de tasa de cambio para un determinado diseño, consiste en dividir al mismo en secciones por funcionalidad. Luego calcular el toggle rate en cada sección y obtener un promedio de todos. En general la mayoría de los diseños con una gran cantidad de lógica tienen un 12.5% de promedio de toggle rate (este porcentaje es el que trae por default la herramienta).

Teniendo en cuenta esta guía y sobredimensionando, se decidió utilizar los siguientes parámetros para obtener una estimación del consumo de la FPGA:

- 100% de uso de recursos de la FPGA (peor caso).
- 40% de toggle rate (a una frecuencia de 150 MHz y 50% de uso)
- DDR3I external memory de 16 bits de datos (memoria usada).
- Temperatura ambiente de 25 °C (environment still air).
- Modelo de la FPGA: Artix-7-XC7A100T-1FTG256C.

Con estos parámetros la herramienta nos da los siguientes datos de salida:

- Consumo y temperatura de la FPGA:

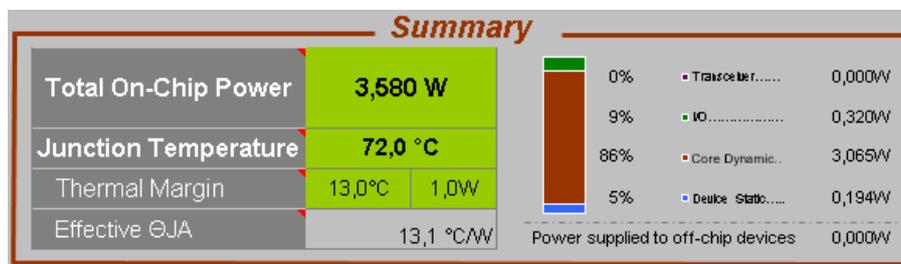


Figura 5-19: Estimación de consumo y temperatura FPGA

- Corriente necesaria por cada tensión de alimentación de la FPGA:

Power Supply		
Source	Voltage	Total (A)
V _{CC} INT	1,000	2,899
V _{CC} BRAM	1,000	0,020
V _{CC} AUX	1,800	0,254
V _{CC} AUX_ID		
V _{CC} 3.3V	3,300	
V _{CC} 2.5V	2,500	
V _{CC} 1.8V	1,800	
V _{CC} 1.5V	1,500	
V _{CC} 1.35V	1,350	0,125
V _{CC} 1.2V	1,200	
V _{CC} ADC	1,800	0,020

Figura 5-20: Estimación de la corriente para cada tensión de la FPGA

Esta última tabla ayudo a determinar las corrientes necesarias para cada buck regulator del integrado ADP5054.

5.3.2. Programa ADP5054 criterio más eficiente

Las conexiones y componentes de este integrados se obtienen mediante el programa “505x BuckDesigner” brindado por Analog Devices. Este programa requiere como datos de entrada:

- Modelo del Regulador
- Temperatura máxima del ambiente.
- Criterio de diseño (más eficiente, menor espacio, menor costo): en este caso se decidió priorizar la eficiencia.
- Tensión de alimentación de cada buck.
- Tensión y corriente de salida de cada buck.

La siguiente figura muestra el menú en donde ingresar dichos parámetros de entrada.

Basic Settings ADP505x

ANALOG DEVICES
IC Selected: ADP5052

Part Select: ADP5054

Features: 4 Bucks +

Ambient Temp (max): 55 Deg C

Design Criteria: Most Efficient

Channel	Type	Use Chan	Source	Vin(min)	Vin(max)	Vout	Iout	Approx. Total Iout
Chan 1	Buck	<input type="checkbox"/>	Same as Rail 1	5	12	1	3	3
Chan 2	Buck	<input checked="" type="checkbox"/>	Same as Rail 1	5	12	1,8	2	2
Chan 3	Buck	<input checked="" type="checkbox"/>	Same as Rail 1	5	12	3,3	1	1
Chan 4	Buck	<input checked="" type="checkbox"/>	Same as Rail 1	5	12	1,35	1	1
Chan 5	LDO	<input type="checkbox"/>	External	2	2	1	0	0

Buttons: Submit/Run, Advanced Settings, Reset Defaults, Preferred Vendors, Program Details, Disclaimers and Warnings, Cancel

Figura 5-21: Menú programa BuckDesigner 5054

A partir de estos parámetros se obtuvo:

- Conexiones del circuito
- Componentes a utilizar
- Diagramas de eficiencia, pérdida de potencia y ganancia

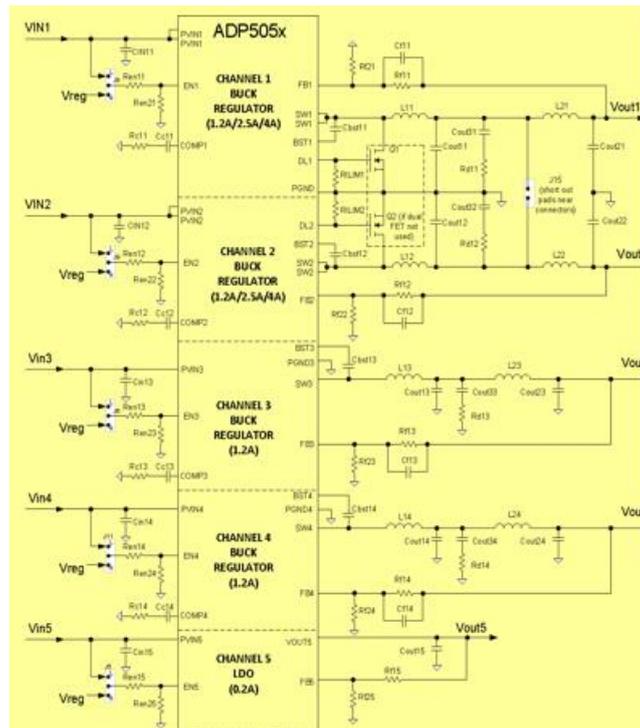


Figura 5-22: Diagrama de conexiones del ADP5054.

5.3.3. Calculo de corriente por vías.

Se corrobora que el tamaño de vías de los header va a ser suficientes para soportar la corriente máxima de cada fuente de alimentación (peor caso 3 A para la tensión de 1V FPGA).

Utilizando la herramienta: Saturn PCB Design, se calculó la corriente máxima que soportan las vías.

Via Characteristics

Via Hole Diameter: 40 mils
 Internal Pad Diameter: 80 mils
 Ref Plane Opening Diam: 94 mils
 Via Height: 62 mils
 Via Plating Thickness: 1 mils

Options:
 Base Copper Weight: 0.25oz
 Plating Thickness: Bare PCB
 Plane Thickness: 0.5oz / 1oz
 Layer Set: Multi Layer

Units: Imperial
 Substrate Options: 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

IPC-2152 with modifiers mode

Via Capacitance: 2.2979 pF	Via DC Resistance: 0.00035 Ohms	Power Dissipation: 0.00638 Watts
Via Inductance: 0.8896 nH	Resonant Frequency: 3520.083 MHz	Conductor Cross Section: 128.8052 Sq.mils
Via Impedance: 19.676 Ohms	Step Response: 49.7348 ps	Via Current: 4.2404 Amps

Information:
 Power Dissipation (dBm): 8.0496 dBm
 Via Thermal Resistance: 48.1 °C/W
 Via Count: 1
 Via Temperature: 48.1 °C/W per via
 Temp in (°C) = 42.0
 Via Voltage Drop: 1.5051 mV
 Temp in (°F) = 107.6

Figura 5-23: Programa Saturn PCB Design calculo máxima corriente por vía.

Se estimó que los headers (tamaño de agujero = 40 mils y largo =62 mils) soportan 4.2 A de corriente máxima.

5.3.4. Calculo Impedancia diferencial

Para calcular las impedancias diferenciales se utilizó el programa “Microstrip & Stripline calculator” desarrollado por Jean Nicolle.

El mismo solo necesita como datos de ingreso la información del stack-up y variando el ancho pista y la separación entre las mismas se puede obtener la impedancia deseada.

Resultados para la impedancia de 90 Ohm +/- 10% requerida por el controlador USB 3.0

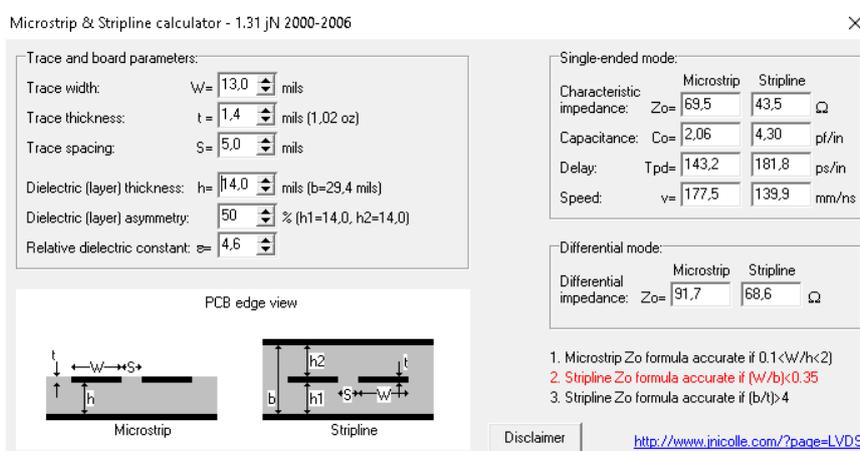


Figura 5-24: Calculo de impedancia diferencial

Con estos valores de ancho de pista y separación de las mismas se creó una regla de ruteo en el Altium Designer para señales diferenciales, como se muestra en las siguientes figuras.

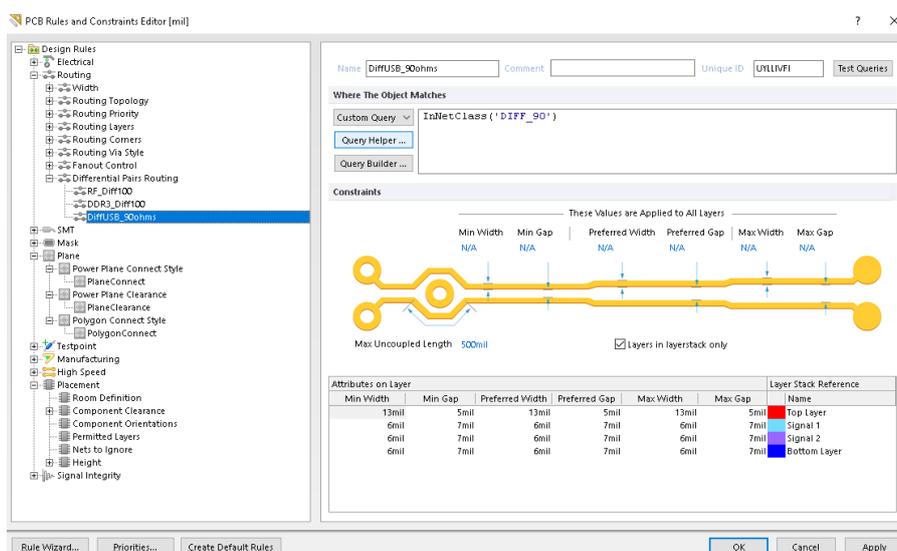


Figura 5-25: Regla de ruteo impedancia diferencial

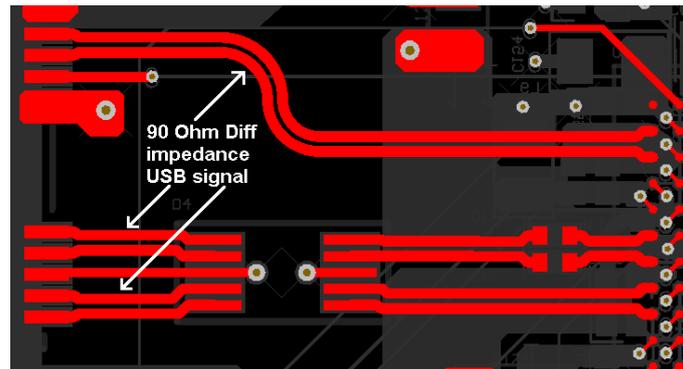


Figura 5-26: Ruteo de impedancia diferencial

Del mismo modo se calculó las demás impedancias diferenciales.

5.3.5. Uso de herramienta xSignals

Algunos de los requerimientos de las conexiones entre el controlador del USB 3.0 y la FPGA son los siguientes:

- Utilización de resistencia de 22 ohm para evitar reflexiones
- Largo máximo de cada línea 5 pulgadas (5000 mil).
- Max diferencia de largo entre las líneas 500 mil.

El principal problema es llevar un seguimiento del largo de cada línea, ya que el ruteo de las mismas se lleva a cabo en diferentes capas y tramos (del controlador a la resistencia y de la resistencia a la FPGA). Por ejemplo las siguientes figuras muestran dos posibles escenarios de conexión entre la FPGA y el controlador.

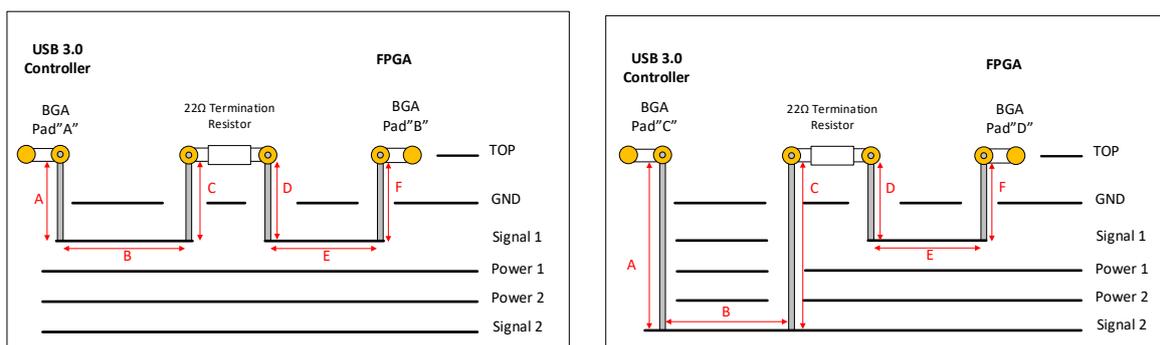


Figura 5-27: Conexiones entre USB 3.0-resistencia-FPGA.

Para cumplir los requerimientos de máxima diferencia entre líneas, la distancia $A+B+C+D+E+F$ de ambas figuras deben ser iguales o menor a 500 mils. Para poder controlar estas distancias se utilizó la herramienta xSignals del Altium Designer, la cual lleva un control de las distancias totales de conexiones entre ambos componentes (el controlador y la FPGA). Esta herramienta en particular está disponible a partir de la versión de Altium Designer 16.0. Si se dispone de una versión anterior hay que sumar manualmente (con una tabla en Excel) cada tramo.

Se descartó la interconexión por medio de la top layer por los siguientes motivos:

- Al ser esta distancia muy corta, crearía una gran restricción para los pad internos de la FPGA ya que su fanout se realiza por vías y por ende su camino será mucho más largo.
- Si se rutea por top algunas señales y otras por capas internas, estas estarían viajando por medios diferentes (microstrip y stripline) por lo que sus velocidades de propagación serían diferentes.
- No hay suficiente espacio en la top layer debido a la presencia de los capacitores de desacople cercanos al integrado.

Mediante la utilización de la misma se genera una regla de ruteo, con la cual se controla el largo de las interconexiones entre ambos integrados. La siguiente figura muestra una de estas reglas:

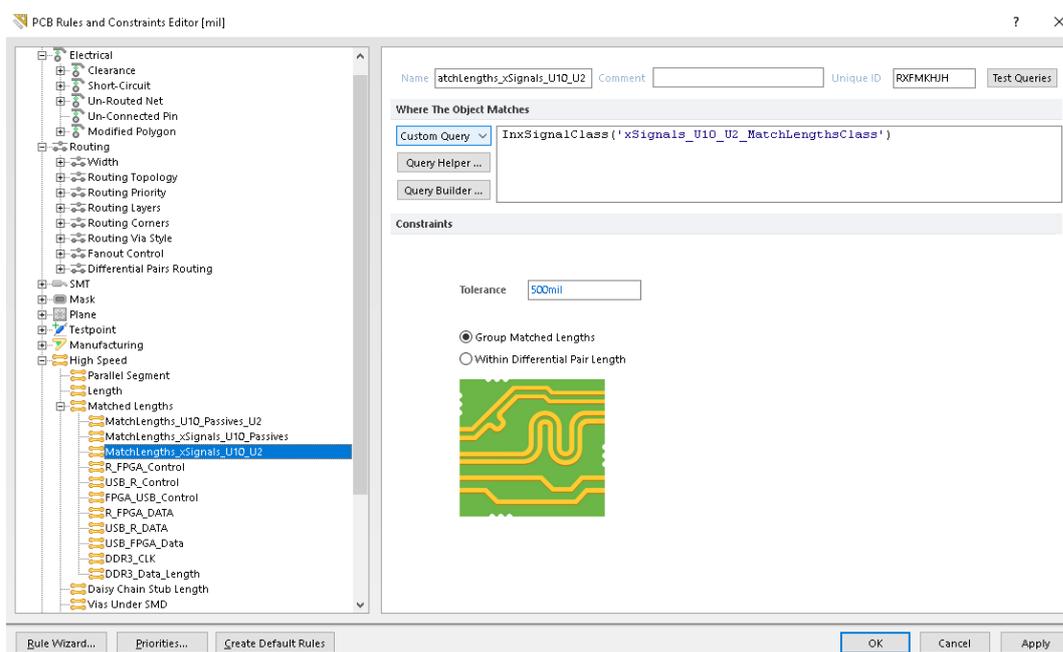


Figura 5-28: Regla de ruteo match length FPGA-USB 3.0

En donde U10 es el controlador del USB 3.0, U2 es la FPGA y la tolerancia de 500 mil es el requerimiento.

En las siguientes tablas muestran las distancias de las conexiones entre el controlador de USB 3.0 y la FPGA:

Name	Routed Length (mil)	Name	Routed Length (mil)	Name	Routed Length (mil)
DQ22	1464	DQ30	1570	CTL0	1476
DQ4	1480	DQ26	1576	CTL1	1483
DQ5	1487	DQ12	1579	CTL2	1470
DQ8	1488	DQ25	1579	CTL3	1552
DQ21	1491	DQ23	1580	CTL4	1486
DQ20	1494	DQ19	1581	CTL5	1569
DQ7	1499	DQ27	1585	CTL6	1559
DQ16	1515	DQ3	1590	CTL7	1472
DQ15	1517	DQ28	1593	CTL8	1542
DQ13	1524	DQ14	1608	CTL9	1599
DQ1	1527	DQ17	1624	CTL10	1509
DQ2	1534	DQ31	1635	CTL11	1537
DQ18	1538	DQ6	1637	CTL12	1557
DQ11	1550	DQ10	1653	PCLK	1724
DQ29	1568	DQ0	1671		
DQ9	1569	DQ24	1676		

Tabla 5-10: Largo de líneas interface FPGA-USB3.0

Como se puede apreciar en las tablas, la máxima diferencia de longitud entre las líneas de interface USB-FPGA es de 260 mil (1724-1464), cumpliendo con el requerimiento de 500 mil de máxima diferencia de longitud.

5.3.6. Coplanar waveguide y ajuste de impedancia

Para calcular la impedancia de las Coplanar Waveguide Grounded (CPWG) se utilizó la herramienta: Saturn PCB Design, la misma pide como datos de entrada: el ancho de la pista (W), separación entre GNDs adyacentes (G), distancia al plano de GND más cercano (H) y la constante dieléctrica del material (Er). Obteniendo como resultado la impedancia de la coplanar waveguide, la siguiente figura muestra el resultado obtenido con esta herramienta:

The screenshot displays the Saturn PCB Design interface for calculating the characteristic impedance (Zo) of a Coplanar Waveguide (CPWG). The input parameters are:

- Conductor Width (W): 19.7 mils
- Conductor Height (H): 14 mils
- Conductor Gap (G): 6 mils
- W/H ratio: 1.407

The calculated Zo is 50.1647 Ohms. The software also shows various options and information:

- Options: Base Copper Weight (0.25oz to 5oz), Plating Thickness (Bare PCB to 3oz), Passive Circuits (Microstrip, Microstrip Embed, Stripline, Stripline Asym, Dual Stripline, Coplanar Wave).
- 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 (2.10 mils), Via Thermal Resistance (N/A), Via Count (1), Conductor Temperature (N/A), Temp in (°C) (N/A), Via Voltage Drop (N/A), Temp in (°F) (N/A).

Figura 5-29: Calculo impedancia CPWG

5.4. Simulaciones

5.4.1. Simulaciones Power

Se simulo una gran parte de la sección de alimentación utilizando la herramienta LTspice. En esta simulación se pudo observar: el correcto funcionamiento del selector de alimentación LTC4412, como la de los convertidores DC-DC: ADP5054, ADP2164.

Las siguientes figuras muestran el circuito y los resultados obtenidos durante la simulación

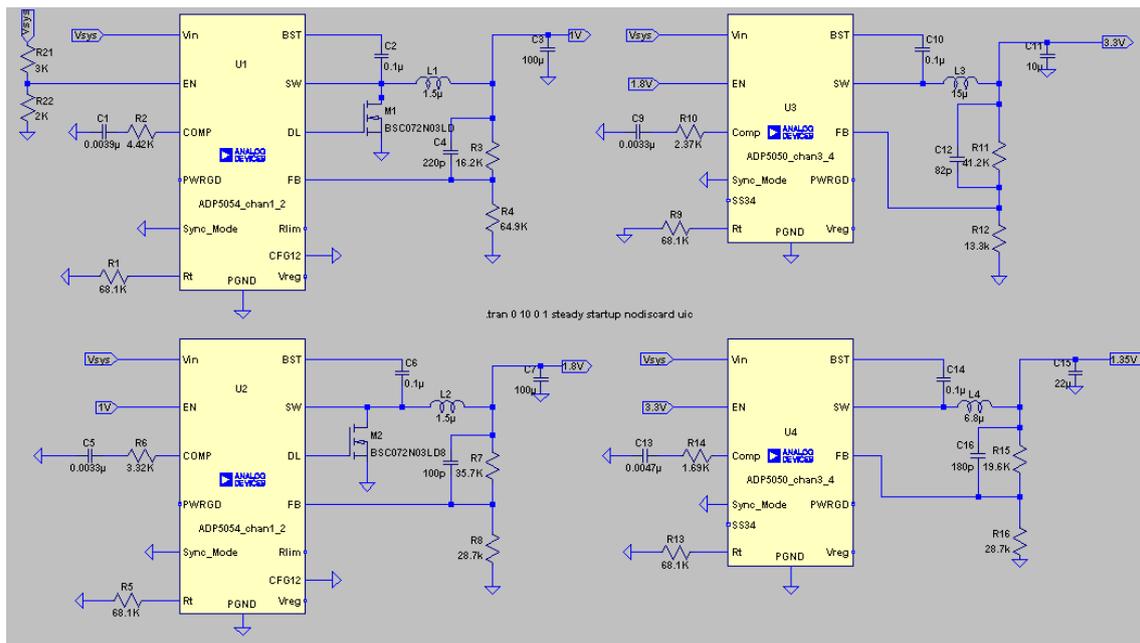


Figura 5-30: Esquemático simulación alimentación ADP5054

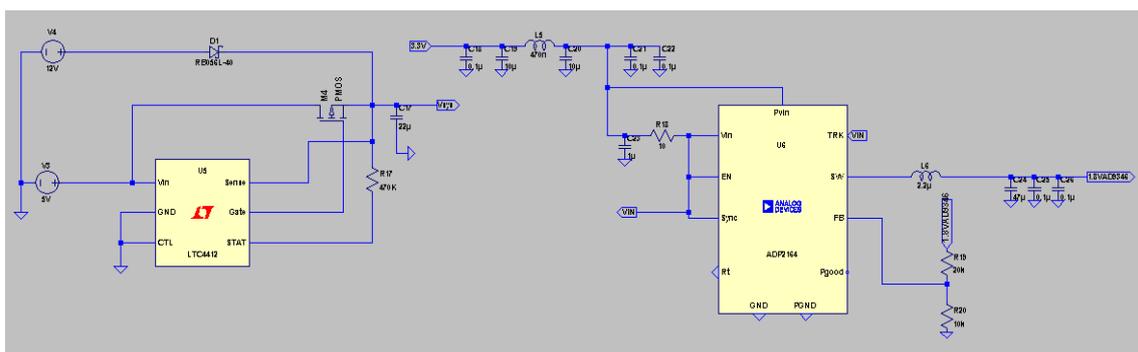


Figura 5-31: Esquemático simulación alimentación de power selector y ADP2164

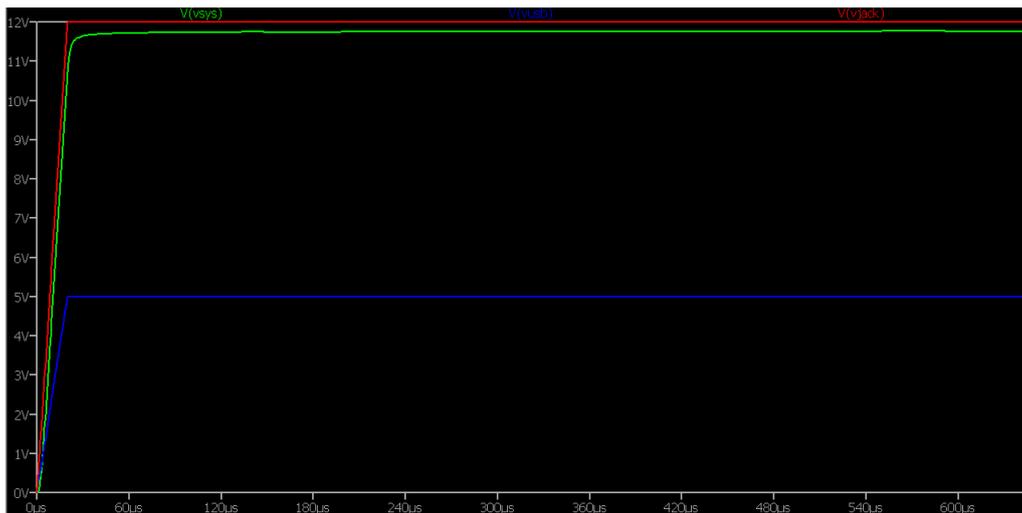


Figura 5-32: Resultado simulación de alimentación, power selector

En esta imagen se puede apreciar el correcto funcionamiento del selector de power LTC4412, ya que ante la presencia de ambas tensiones de alimentación (USB y Jack), la tensión de salida es la provista por el Jack.

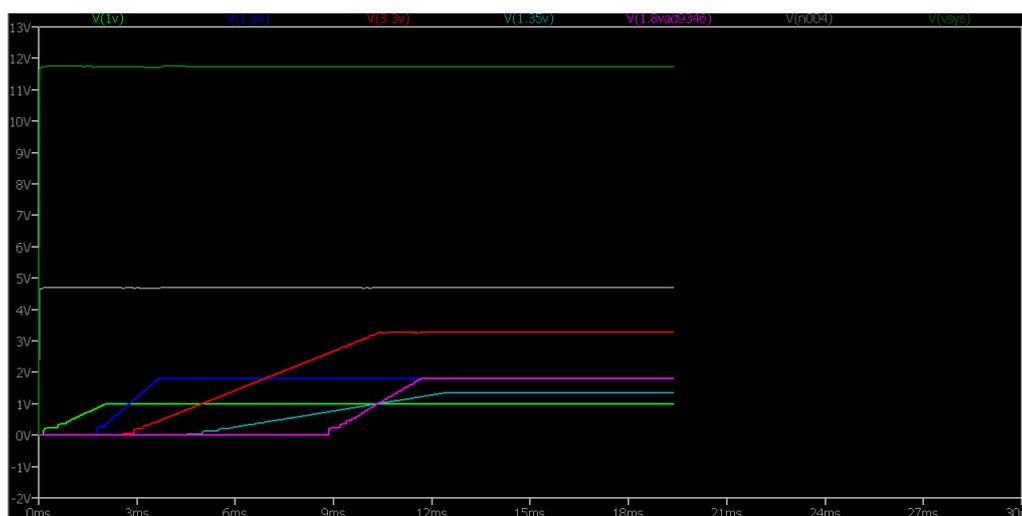


Figura 5-33: Resultado simulación de alimentación, tensiones de salida

En esta figura se puede apreciar que los niveles de tensión y la secuencia de encendido de la FPGA son los correctos.

5.4.2. Simulaciones etapa de RF AD9364 con ADS

Se realizó la simulación de la sección de Rx, desde los puertos diferenciales Rx del AD9364 hasta el puerto SMA, para la obtención de una estimación del coeficiente de reflexión en el puerto SMA.

La simulación consistió en sacar los parámetros S de la sección de RF Rx del PCB, utilizando la herramienta Momentum del ADS. Luego se realizó una simulación conjunta con parámetros S del PCB y los parámetros S de los componentes (puerto diferencial AD9364, capacitores en serie

y balun). Obteniendo como resultado una estimación del parámetro S11 (en el puerto del SMA). El mismo indica el nivel de desadaptación en el rango de frecuencia entre 70Mhz y 6Ghz.

Momentum

Momentum es un simulador electromagnético el cual obtiene los parámetros S de circuitos planos, incluyendo microstrip, slotline, stripline, coplanar waveguide y otras topologías. La conexiones mediante vías permiten la simulación de: un PCB multicapa de RF/microwave, híbridos, circuitos integrados, etc. Momentum provee un set completo de herramientas para predecir la performance de: circuitos de alta frecuencia, antenas y circuitos integrados.

Momentum está basado en una técnica numérica de discretización llamada "method of moments" (MoM). Esta técnica es utilizada para resolver las ecuaciones electromagnéticas de Maxwell para estructuras planas embebidas en un sustrato dieléctrico de multicapa. Los modos de simulación disponible en el Momentum (microwave y RF) están basados en esta técnica, pero utilizan diferentes variaciones de la misma para obtener sus resultados.

Para información sobre como información sobre esta herramienta ver [29]

Simulación ADS Momentum

Para realizar esta simulación se exporto el diseño del PCB en Altium en formato ODB++, el cual contiene toda la información necesaria para realizar la simulación (nets, stackup, componentes, layers, etc). Luego se importó este archivo en el ADS y se acoto el circuito a la sección en la cual se iban a realizar la simulación de Momentum. La siguiente figura muestra el circuito ya importado y reducido:

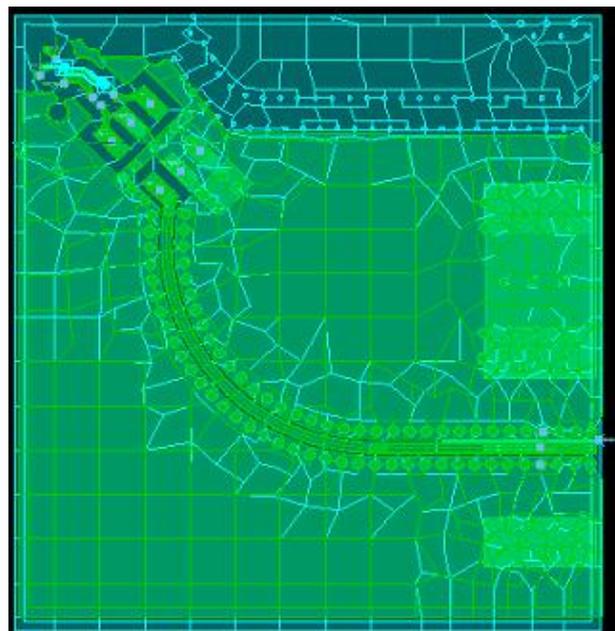


Figura 5-34: Circuito importado y reducido

Luego se realizó la simulación de Momentum sobre la capa del Top para la obtención de los parámetros S de esta sección. Esta simulación se realizó con las siguientes configuraciones:

- Rango de frecuencia de 70 MHz a 6 GHz (100 puntos).
- No se aplicó calibración de puertos.
- Se agregaron puertos de GND en las vías como referencia de los demás puertos.
- Mesh density 40 CpW para cada net y auto ajuste en los bordes.

Con los parámetros S obtenidos del PCB se realizó una simulación conjunta (Co-Simulation) con los parámetros S de los componentes para obtener el S11 (coeficiente de reflexión) a la entrada del conector de RF. La siguiente figura muestra el esquemático en donde se encuentran tanto el pcb como los componentes con sus respectivos parámetros S.

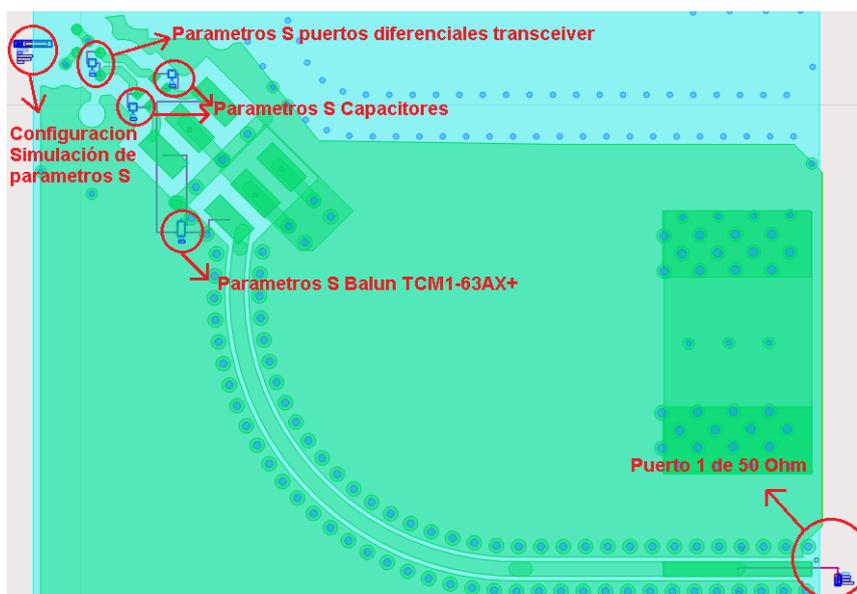


Figura 5-35: Esquemático simulación parámetros S

Obteniendo el siguiente resultado:

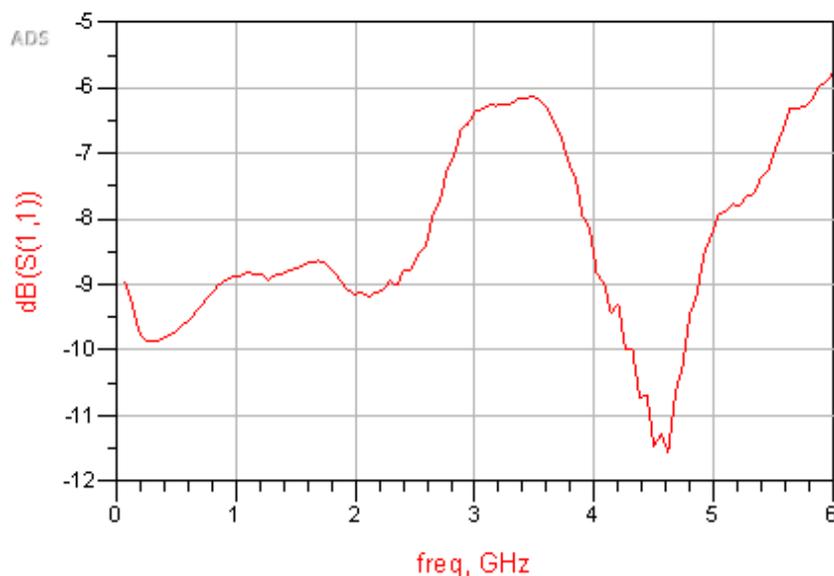


Figura 5-36: Coeficiente de reflexión en conector SMA

A partir de este resultado del coeficiente de reflexión se puede determinar cuánta de la potencia es reflejada y cuánta es transmitida. La siguiente tabla muestra el porcentaje de potencia reflejada/ transmitida dependiendo del parámetro S11:

Return Loss (dB)	VSWR	Reflection Coefficient, Γ	Mismatch Loss (dB)	Reflected Power (%)	Through Power (%)
1	17.39	0.891	6.868	79.43	20.57
2	8.72	0.794	4.329	63.10	36.90
3	5.85	0.708	3.021	50.12	49.88
4	4.42	0.631	2.205	39.81	60.19
5	3.57	0.562	1.651	31.62	68.38
6	3.01	0.501	1.256	25.12	74.88
7	2.61	0.447	0.967	19.95	80.05
8	2.32	0.398	0.749	15.85	84.15
9	2.10	0.355	0.584	12.59	87.41
10	1.92	0.316	0.458	10.00	90.00
11	1.78	0.282	0.359	7.94	92.06
12	1.67	0.251	0.283	6.31	93.69
13	1.58	0.224	0.223	5.01	94.99
14	1.50	0.200	0.176	3.98	96.02
15	1.43	0.178	0.140	3.16	96.84
16	1.38	0.158	0.110	2.51	97.49
17	1.33	0.141	0.088	2.00	98.00
18	1.29	0.126	0.069	1.58	98.42
19	1.25	0.112	0.055	1.26	98.74
20	1.22	0.100	0.044	1.00	99.00

Tabla 5-11: Relación entre return loss y potencia reflejada, transmitida

Observando la figura 5-36 se puede ver que en el peor de los casos se tiene un 25% de potencia reflejada. Al cubrir un gran ancho de banda la performance del balun (TCM1-63AX) y la adaptación de impedancia no son óptimas. La siguiente figura muestra el Insertion loss y el return loss del balun utilizado:

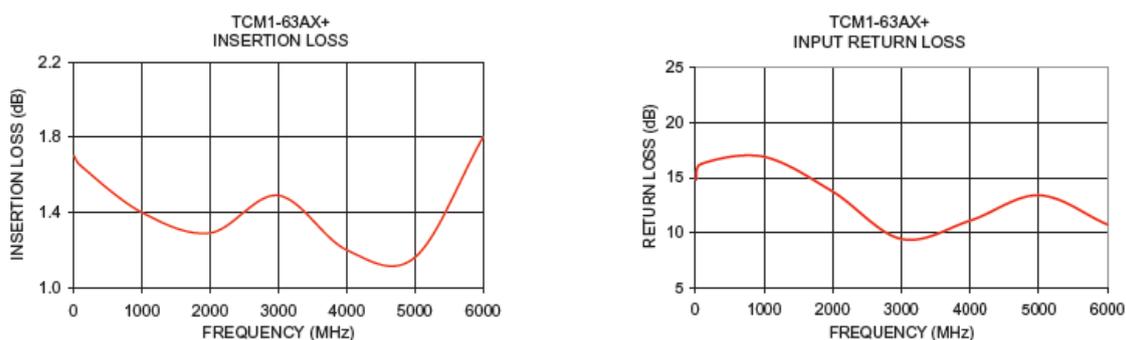


Figura 5-37: Insertion Loss y Return Loss del balun TCM1-63AX+

El resultado de la simulación (figura 5-36) es peor que la performance del balun debido a la diferencia de impedancia entre el balun (50 Ohm 1:1) y el transceiver (impedancia variable con respecto a la frecuencia). A continuación se mostrara los resultados de una simulación en ADS para analizar esta desadaptación observando el coeficiente de reflexión r:

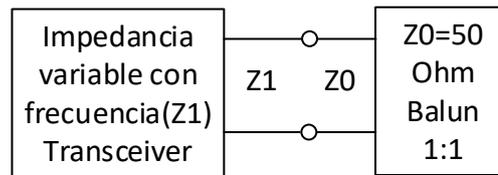


Figura 5-38: Diagrama desadaptación de impedancia balun-transceiver

En donde r:

$$\Gamma = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0}$$

Obteniendo el siguiente resultado de la simulación:

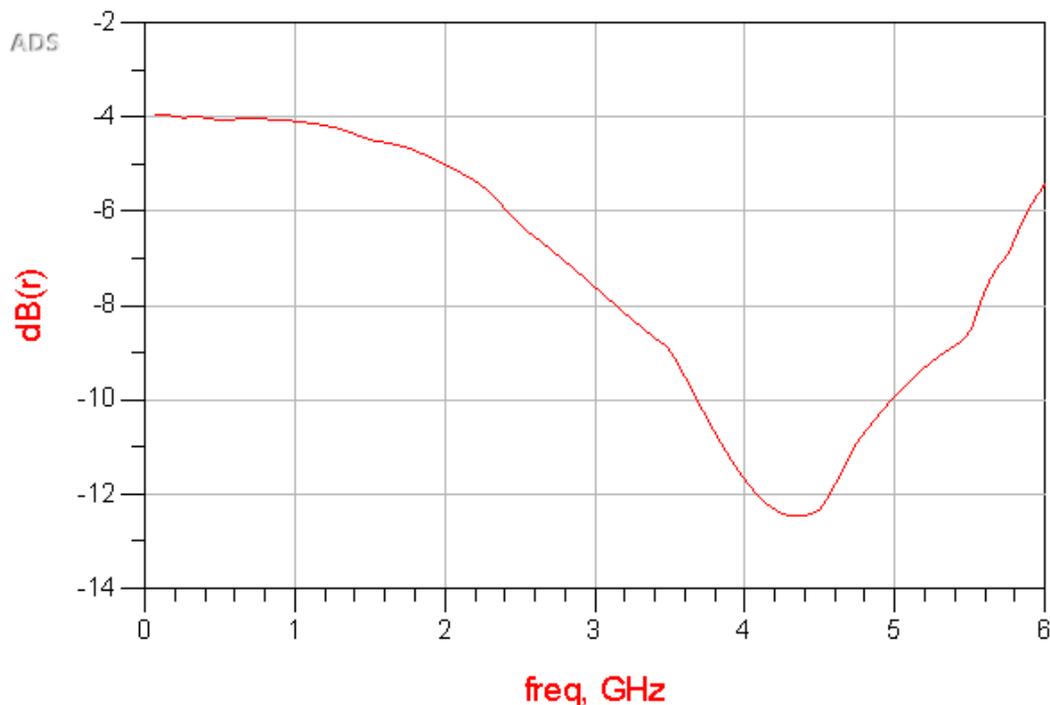


Figura 5-39: Resultado simulación coeficiente de reflexión balun-transceiver.

Se puede observar que esta desadaptación empeora la performance del balun en el rango de 0 a 3.8 GHz (aproximadamente) y mejora de 3.8 a 5 GHz. Estos efectos se ven en el resultado total de la figura 5-36.

En cambio si se realiza la mejora propuesta en la sección 4.4 (dividir el rango de frecuencia en varios subrangos más acotados), por ejemplo utilizando el balun 2450BL07A0050 (de impedancia 50 Ohm y 1:1), mediante una simulación similar:

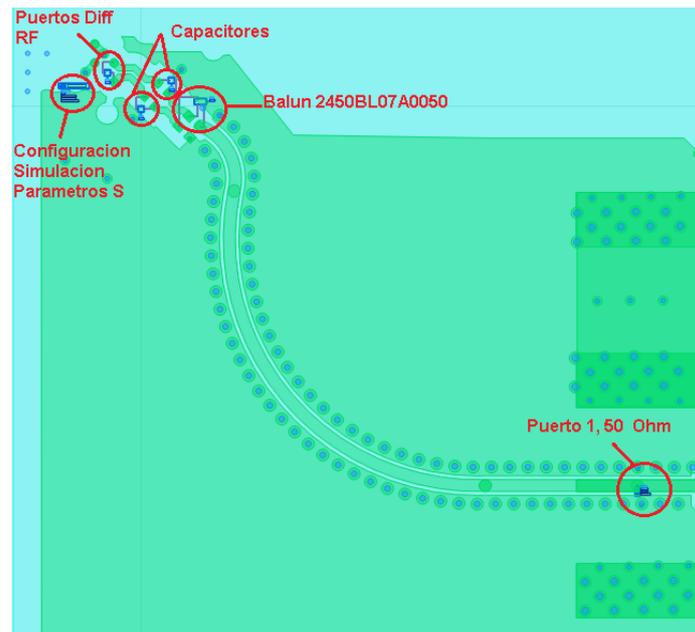


Figura 5-40: Circuito simulación parámetros S, análisis desadaptación balun-transceiver

Obteniendo el siguiente coeficiente de reflexión:

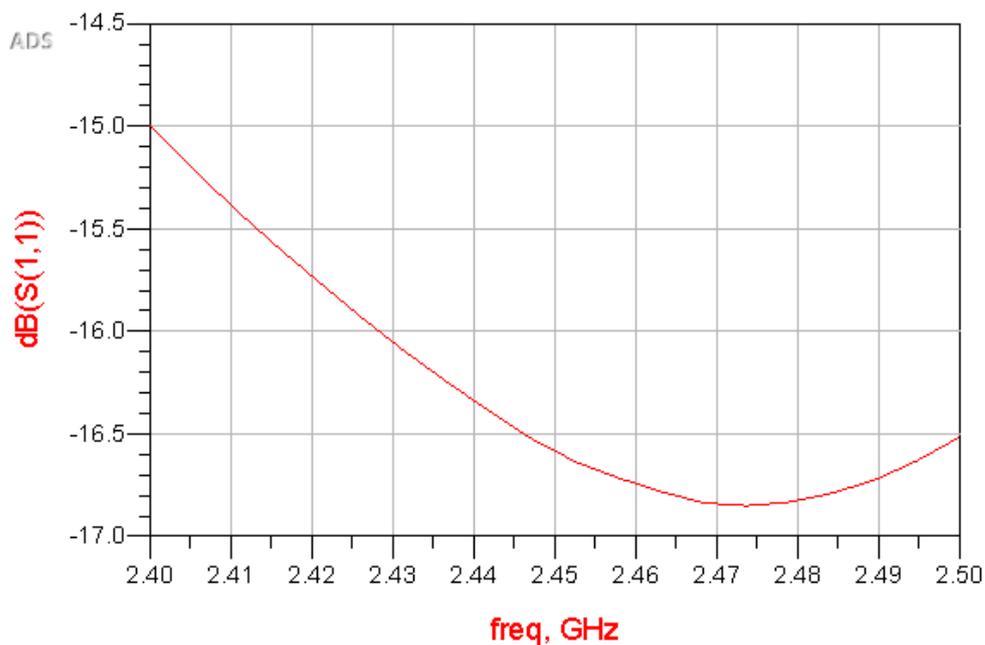


Figura 5-41: Resultado simulación, análisis desadaptación balun-transceiver

En la misma se puede observar que la máxima potencia reflejada es de un 3%. Esto es debido a que el balun utilizado tiene mejor performance pero un ancho de banda mucho menor. Este resultado se puede mejorar utilizando una red de adaptación que transforme la impedancia del transceiver a una de 50 Ohm (impedancia del balun).

La siguiente imagen muestra el Insertion loss y el return loss del balun 2450BL07A0050. Este

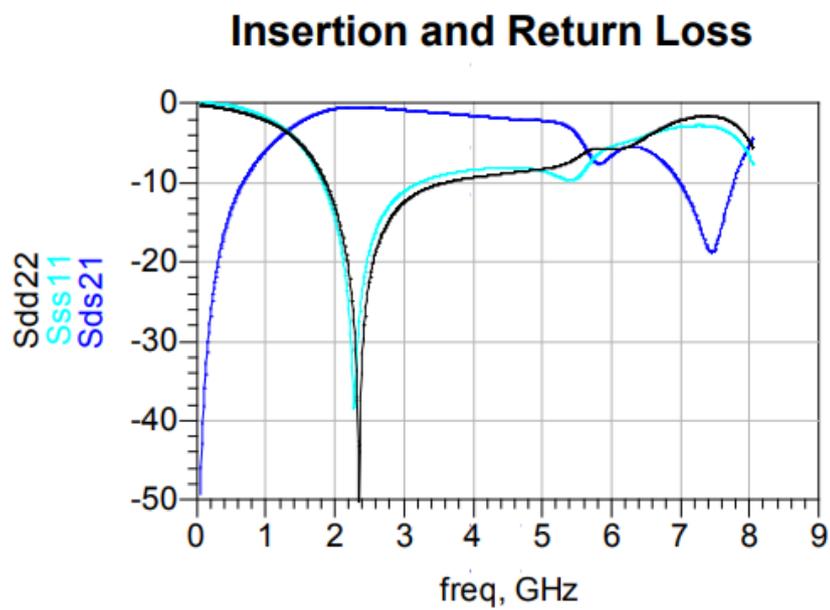


Figura 5-42: Inserción y pérdida de retorno del balun 2450BL07A0050

5.5. Información general y hoja de datos

5.5.1. Recomendaciones por parte de los principales IC

Integrado	Nombre	Comentarios
FPGA	Recommended Design Rules and Strategies for BGA Devices-UG1099	<ul style="list-style-type: none"> • Fan out del BGA
	7 Series FPGAs PCB Design Guide -UG483	<ul style="list-style-type: none"> • Capacitores a usar y sus posiciones. • Orden power layer en stackup. • Impedancia de pistas.
AD9364	AD9364 Reference Manual UG-673. FAQ AD9364 RF Port Interface	<ul style="list-style-type: none"> • PCB material y selección del stack • RF layout • Fan-out and trace-space layout guidelines • Colocación de componentes y guía de ruteo • Power management y consideraciones de ruido
USB 3.0	Hardware Design Guidelines and Schematic Checklist- AN70707	<ul style="list-style-type: none"> • Recomendaciones a seguir tanto en hardware como en el esquemático.
DDR3 Memory	Hardware Tips for Point-to-Point System Design: Termination, Layout, and Routing	<ul style="list-style-type: none"> • Recomendaciones a seguir tanto en hardware como en el esquemático.

Tabla 5-12: Información hardware de cada sección

5.5.2. Capacidades Fabricante PCB Prototype

Toda la información en cuanto a las capacidades de fabricación de PCB Prototypes se encuentra en el siguiente link:

<https://www.pcbprototype.com/en/pcb-capabilities>

La mayoría de estas capacidades fueron impuestas como requerimientos del PCB en forma de reglas de ruteo.

5.5.3. Información sobre conexiones de cada sección

Integrado	Seccion	Guia de usuario
FPGA	Slave Serial Configuration. JTAG	7 Series FPGAs Configuration-UG470
	DDR3 Memory	7 Series FPGAs Memory Interface Solutions-UG586
	I/O	7 Series FPGAs SelectIO Resources-UG471
	Clock	7 Series FPGAs Clocking Resources-UG472
USB 3.0	Interface GPIF FPGA	Designing with the EZ-USB® FX3™ Slave FIFO Interface AN65974
	Boot FPGA	Configuring an FPGA Over USB Using Cypress EZ-USB® FX3™ AN84868
	Interface USB	EZ-USB® FX3™/FX3S™ Hardware Design Guidelines and Schematic Checklist AN70707
	Boot USB 3.0	EZ-USB® FX3™/FX3S™ Boot Options-AN76405
AD9364	Interface	AD9364 Reference Manual UG-673

Tabla 5-13: Información conexión integrados principales

5.5.4. Esquemático, Gerbers, BOM

Todos los archivos del Proyecto fueron almacenados en el siguiente repositorio de Github:

<https://github.com/OmarLopezCabrera/Tesis-SDR-LAPAC-Open-Source>

Referencias

- [1].Mitola J. and Maguire G. Q. Cognitive radio: Making software radios more personal. IEEE Personal Communications, 6, 13–18, August 1999.
- [2].R. J. Lackey and D. W. Upmal, “Speakeasy: the Military Software Radio”, IEEE Communications Magazine, vol. 33, pp. 56-61, 1995.
- [3].AD9364 Reference Manual UG-673. [\[Link\]](#)
- [4].EZ-USB FX3 Technical Reference Manual. [\[Link\]](#)
- [5].2 Gb: x4, x8, x16 DDR3L SDRAM Description. [\[Link\]](#)
- [6].All Programmable 7 Series Product Selection Guide. [\[Link\]](#)
- [7].Información sobre USRP B200 mini. [\[Link\]](#)
- [8].Información sobre Lime SDR. [\[Link\]](#)
- [9].Información sobre BladeRF xA4. [\[Link\]](#)
- [10].Implementing Carrier Phase Recovery Loop Using Vivado HLS Author: Alex Paek, Duncan Mackay, May 2, 2013. [\[Link\]](#)
- [11].Quick start guide MicroBlaze. [\[Link\]](#)
- [12].Xilinx Power Estimator User Guide. [\[Link\]](#)
- [13]. RF Agile Transceiver AD9364 data sheet. [\[Link\]](#)
- [14]. USB 3.0 Core IO Power. [\[Link\]](#)
- [15]. DDR3 Power Calculation. [\[Link\]](#)
- [16]. R.Machado and A. Wyglinski, “Software-defined radio: Bridging the analog digital divide” Proceeding of the IEEE, vol. 103 no. 3, pp 409-423, march 2015. [\[Link\]](#)
- [17].Software-Defined Radio for Engineers, by Travis F. Collins, Robin Getz, Di Pu, and Alexander M. Wyglinski, 2018, pp 171-190.
- [18].FPGA-based Implementation of Multiple PHY Layers of IEEE 802.15.4 Targeting SDR Platform. [\[Link\]](#)
- [19].Designing with the EZ-USB FX3 Slave FIFO Interface [\[Link\]](#)
- [20].AXI Reference Guide. [\[Link\]](#)
- [21].AXI Memory Mapped to Stream Mapper [\[Link\]](#)
- [22].Información sobre libio Analog Devices. [\[Link\]](#)
- [23].Información drivers transceiver AD9364. [\[Link\]](#)
- [24].EZ-USB FX3 Software Development Kit. [\[Link\]](#)
- [25].Using the FX3 SDK on Linux Platforms [\[Link\]](#)
- [26].Cuadro de atribución de bandas de frecuencias de la República Argentina [\[Link\]](#)

[27].FAQ AD9364 RF Port Interface [\[Link\]](#)

[28].Información sobre CPWG [\[Link\]](#)

[29].Electromagnetic Advanced Design System [\[Link\]](#)

[30].AN84868 - Configuring an FPGA Over USB Using Cypress EZ-USB® FX3™ [\[Link\]](#)

[31]. Home of the USRP™ Software-Defined Radio [\[Link\]](#)

Bibliografia

- 1- Implementing Software Defined Radio. Eugene Grayver
- 2-Software-Defined Radio for Engineers. Travis F. Collins, Robin Getz, Di Pu, and Alexander M. Wyglinski
- 3-Software-Defined R ware-Defined Radio Handbook 14th Edition (Pentek)
- 4-Software Defined Radio: Origins, Drivers and International Perspectives. John Wiley & Sons, 2002
- 5- Software-defined Radios: Architecture, State-of-the-art, and Challenges. Rami Ak-eela, and Behnam Dezfouli
- 6- Microwave Engineering. David M.Pozar
- 7-High Speed Digital Design: A Handbook of Black Magic. Hardcover
- 8- Application Note on Transformers (AN-20-002) Minicircuits.