Contenido

[1. Estado del Arte 2](#_Toc104068184)

[1.1. Introducción 2](#_Toc104068185)

[1.2. SOCs 2](#_Toc104068186)

[1.2.1. Concepto de SOC 3](#_Toc104068187)

[1.2.1.1. Flujo de diseño e IPs 5](#_Toc104068188)

[1.2.2. Tecnología de Fabricación 7](#_Toc104068189)

[1.2.3. SOCs en FPGA 10](#_Toc104068190)

[1.2.3.1. FPSoCs 11](#_Toc104068191)

[1.2.3.2. eFPGAs en SoCs 14](#_Toc104068192)

[1.3. Buses de comunicación On-Chip La arquitectura AMBA. 16](#_Toc104068193)

[1.3.1. Arquitectura AMBA 17](#_Toc104068194)

[1.4. Aplicaciones de los SOCs FPGA en la Industria y aportación a los ODS. 20](#_Toc104068195)

[2. Entorno de Trabajo 21](#_Toc104068196)

[2.1. Herramientas de desarrollo SW/HW Xilinx 21](#_Toc104068197)

[3. Motores sin escobillas (Brushless) 22](#_Toc104068198)

[3.1. Control y alimentación de los motores sin escobillas. 22](#_Toc104068199)

[4. Desarrollo y creación de un SOC en FPGA 22](#_Toc104068200)

[4.1. Planificación. 22](#_Toc104068201)

[4.2. Fase de diseño general. 23](#_Toc104068202)

[4.3. Desarrollo IP 24](#_Toc104068203)

[4.3.1. Diseño. 24](#_Toc104068204)

[4.3.2. Programación Hardware. 25](#_Toc104068205)

[4.3.2.1. Filtros HALL 27](#_Toc104068206)

[4.3.2.2. PWM 28](#_Toc104068207)

[4.3.2.2.1. Generador PWM 28](#_Toc104068208)

[1.1. Mapa de registros AXI4-Lite del IP creado. 33](#_Toc104068209)

[2. Maqueta Demo Alimentación Motor Brushless. 35](#_Toc104068210)

[2.1. Diseño 35](#_Toc104068211)

[2.2. Componentes 36](#_Toc104068212)

[Basys3 Artix-7 FPGA Board. 37](#_Toc104068213)

[Inversor BOOSTXL-3PHGANINV 37](#_Toc104068214)

[Motor Brushless Modelo 2163788 38](#_Toc104068215)

[Convertidor niveles lógicos bidireccional. 39](#_Toc104068216)

[Fuentes de alimentación. 40](#_Toc104068217)

[2.3. Esquema Eléctrico 41](#_Toc104068218)

[4.1. Montaje de la maqueta de pruebas. 44](#_Toc104068219)

[BIBLIOGRAFIA. 45](#_Toc104068220)

# Estado del Arte

## Introducción

En este estado de la cuestión se ha buscado plasmar aquellos conceptos que permitan tener unas nociones básicas del campo y el entorno en el cual se encuentra involucrado este TFG.

Es por ello por lo que se han condensado en los 3 siguientes puntos aquella información que permita como ya se ha mencionado dar una perspectiva actual en la industria de la temática del TFG mismo.

## SOCs

Gráfico, Gráfico en cascada

Descripción generada automáticamenteEn la evolución sufrida en las últimas décadas dentro del desarrollo de dispositivos electrónicos, ha dado lugar a la aparición de multitud de estrategias a la hora de abordar y resolver los desafíos que presenta el mercado electrónico actual.  
Dentro del desarrollo de la electrónica digital concretamente los circuitos integrados “IC” aparecen conceptos como ASIC, FPGA, SoCs , FPSoCs, ASSP, etc.. , tejiendo una red de dispositivos, propiedades y aplicaciones altamente interconectadas de forma híbrida entre sí, los cuales no permiten discernir correctamente unos conceptos de otros.

Como se puede observar en la siguiente imagen se aprecian una gran variedad de circuitos integrados a cada uno de ellos con sus características particulares frente a otros

## Concepto de SOC

Los sistemas en chip (SoC) han surgido en las últimas décadas como una clase importante de sistemas VLSI. Un SOC es un sistema que incorpora la mayoría o todos los componentes necesarios para una aplicación y que utiliza procesadores programables como componentes del sistema.[1]  
Otra posible definición de SOC es como el bloque funcional que tiene la mayor parte de la funcionalidad del sistema, excepto algunos bloques de interfaz, que no son realizables por las tecnologías CMOS o compatibles con CMOS.[2]

Los dominios de aplicación afectan de forma sustancial a los periféricos hardware, los tamaños de memorias empleadas y la naturaleza de los buses de comunicación empleados.  
En los sistemas SoCs la estructura genérica que se puede encontrar en todos ellos es la siguiente.

* Processor Cores

Los núcleos (core) son las unidades más pequeñas de un procesador capaces de ejecutar instrucciones e interactuar con otros bloques funcionales de sistema.  
La mayoría de los System on Chip, sus procesadores se caracterizan por ser mono o multinúcleo.  
Dentro de los procesadores multinúcleos estos arrojan una problemática interesante desde el punto de vista del software debido a la necesidad de coordinación entre sus tareas individuales y colectivas.  
De ellos resultan dos tipos de arquitecturas, la AMP y la SMP.  
La arquitectura AMP (asymetric multiprocesing), en ella se reparte el software de forma específica para cada core. Estos últimos funcionan de forma independiente con su propia memoria y espacio de memoria reservado de forma exclusiva.  
Cada procesador tiene sus propias interrupciones y periféricos.  
La forma de comunicar entre Cores será a través de interrupciones o memoria compartida.

Para la arquitectura SMP (Symmetric multiprocessing), en este caso el sistema operativo es compartido por todos los núcleos. El OS determina cual es el núcleo más apto para realizar un trabajo concreto, esto implica que todos sean genéricos. En este formato de estructura la memoria es una zona común a todos los cores, ya que en función de la carga de estos puede requerir el sistema operativo su acceso por uno u otro.  
Esta arquitectura es muy común para realizar trabajos genéricos y cuando existen necesidades de cálculo.[2]

* Memorias Embebidas.

Las memorias integradas se realizan a partir de macros duras para las cuales están disponibles numerosas configuraciones posibles para cada tecnología concreta.  
Los vendedores pueden ofrecer herramientas de selección llamados compiladores de memoria.  
Entre las opciones habituales disponibles están el número de palabras disponibles, el ancho de bits, el número de sub-bancos o el grado de multiplexación de columnas.  
Las pequeñas memorias por otro lado, son diseñadas utilizando flip-flops y registros.

* Cores Analógicos

Los cores analógicos más comunes son amplificadores operaciones, amplificadores de potencia, serializadores, deserializadores, PLL y bloques de circuitos integrados de señales mixtas.

* Interfaz Cores.

Un elemento esencial dentro de los SoCs son las interfaces y bloques de comunicación. Distintos buses como UART, SPI,AXI o AHB que pueden estar presentes varios a la vez, permiten la comunicación entre los distintos cores del chip.[2]

Diagrama, Esquemático

Descripción generada automáticamente

## Flujo de diseño e IPs

En las pasadas dos décadas la reutilización de IPs se ha extendido de forma masiva en la industria. Los IP (Intelectual Property) se refieren a la inclusión en el diseño de componentes previamente diseñados y testeados.  
  
A partir del momento en el cual se han empezado a incluir, estos han potenciado todo el ciclo de vida de los circuitos integrados pasando por el diseño, fabricación, ensamblado y distribución.  
En otras palabras, se han convertido en una herramienta muy potente a la hora de desarrollar SoCs en la industria mejorando los rendimientos, costes y los tiempos de mercado.  
  
Dentro de los IPs disponibles a incorporar en un SoC se diferencian en función del formato y punto de incorporación al diseño. En función de su flexibilidad y portabilidad se pueden destacar los siguientes tres tipos:[3]

* Hard Cores: Cuando los cores van a ser utilizados en sistemas diferentes, debe ser posibles adaptarlos sin realizar ningún cambio en ellos (o casi ninguno).

Son, por lo tanto, muy poco flexibles pero muy predecibles y fiables a la hora de implementarlos. Incluyen información del place and route. Un ejemplo de estos tipos de cores son procesadores y memorias.

* Firm Cores: Se encuentran a mitad de camino entre los hard cores y los soft cores, son bloques configurables pero que también contienen algo de información del place and route. Tienen una flexibilidad limitada y una predictibilidad aceptable en la implementación.
* Soft IP: Estos IPs suelen incorporarse en formato de archivos HDL o netlist (listas de puertas lógicas y sus respectivas conexiones). Son altamente flexibles, pudiéndose personalizar de forma específica para cada aplicación. Sin embargo, ese grado de flexibilidad y formato los hacen poco predecibles en la implementación.

Diagrama

Descripción generada automáticamenteLa influencia de estos tres tipos de IPs durante el flujo de diseño se puede apreciar en la siguiente imagen.

Durante el segundo paso diseño, después de desarrollar/requerir todos los Soft IPs estos son integrados con el fin de generar la descripción RTL de todo el sistema.  
Tras la posterior síntesis el integrador de SoC genera a partir de la descripción RTL una lista de red (gate-level netlist) basada en los bloques lógica y de entrada/salida. En este momento el integrador puede añadir los IPs con información del place and route (Firm IP Cores).  
Durante la fase de implementación la netlist sintetizada es traducida a una distribución física basada en las propiedades físicas de los bloques lógicos y de entrada/salida. A su vez en este momento el diseñador puede optar por importar un IP de carácter Hard Core. Este IP es proporcionado habitualmente en formato GDSII o su sucesor OASIS.  
Estos formatos incorporan información de los datos del IP como las formas, ubicación y propiedad de los elementos que lo integran.  
Finalmente se realizan pruebas al diseño entre las cuales se encuentran el análisis temporal y la tasa de consumo del sistema. Una vez concluido satisfactoriamente se genera un archivo en formato GDSII u similar del layout final con el fin realizar su posterior fabricación en la fundición. [4]

## Tecnología de Fabricación

Las tecnologías en las que se basan los SoCs actuales son las siguientes: ASICs, ASSPs y FPGAs

* ASIC

Diagrama

Descripción generada automáticamenteApplication-Specific Integrated Circuit es un dispositivo cuyo propósito es satisfacer los requisitos para una aplicación particular.  
Una clasificación aceptada de este dispositivo lo divide en 4 grandes categorías: (GA) Gate Arrays, Structured ASICs, Standard Cell (SC) y los Full Custom.[5]

En el caso del Full Custom el diseñador tiene el control entero sobre cada capa del chip de silicio fabricado. El nivel de control es alto pudiendo, por ejemplo, alterar las dimensiones de los elementos lógicos individuales. Si por ejemplo se necesitan unas prestaciones temporales sobre una puerta lógica el ingeniero puede modificar sus dimensiones con el fin de obtener dichas consideraciones.  
Estos dispositivos pueden incluir parte analógica como comparadores, filtros, convertidores A-D o D-A.  
El diseño de estos dispositivos es altamente complejo y requiere de tiempo sin embargo estos concentran la tasa más alta de lógica con el mínimo consumo de energía posible resultando en una reducción de desperdicio en el silicio.

Otro forma de realizar los circuitos es mediante Gate Arrays , los fabricantes como su nombre lo indica generan una malla de resistencias y transistores sin conectar los cuales se recogen en células “Basic Cells” organizadas por capas.  
Estos dispositivos son configurados posteriormente en fábrica realizando las conexiones pertinentes entre las distintas celdas según el diseño escogido.  
  
Los Structured ASICs, las capas de máscara lógica son definidas por el proveedor o terceros. La personalización se realiza mediante la creación de capas de metal personalizadas que realizan las conexiones entre los elementos inferiores de capas predefinidos. Este modelo se encuentra a medio camino entre los Gate Arrays y los Standard Cell ya que en este caso solo se produce una pequeña cantidad de capas del chip dando por ello lugar a gastos no recurrentes mucho más pequeños que los dispositivos de celda estándar   
  
Los dispositivos Standard cell tienen muchas semejanzas con las Gate Arrays, a su vez el proveedor ofrece la lógica disponible recogida en los Basic Cells, sin embargo los proveedores de estas nuevas células también suministran bibliotecas de macros duras y blandas que incluyen procesadores, controladores y funciones de comunicación. También suelen incluir una selección de RAM y ROM. Finalmente una particularidad muy importante es la capacidad de los ingenieros en utilizar diseños previamente elaborados o comprar bloques de propiedad intelectual “IP” que se pueden añadir al diseño.

* ASSP

Los ASIC son un componente diseñado y utilizado por una empresa única para un sistema específico.  
Sin embargo los Application-Specific Standard Product son de un uso más general, efectivamente se crean utilizando las herramientas y tecnologías ASIC, pero a diferencia de estos primeros son utilizados para un uso más general para múltiples empresas de diseño de sistemas.

* Circuitos Lógicos Programables y FPGAS

Diagrama

Descripción generada automáticamenteLos PLDs reprogramables son componentes electrónicos utilizados para construir circuitos electrónicos digitales reconfigurables. A diferencia de los ASICs estos salen de fábrica sin ninguna función específica y necesitan de ser programados o reconfigurados para poder ser usados.  
  
Los PLDs programables en campo pueden dividirse en los siguientes grupos  
  
Los PLA, PAL, CPLD y SPLD sus recursos elementales realizan las operaciones lógicas más sencillas del mismo tipo y suelen combinarse en matrices.Por otro lado los FPGA, sus recursos elementales tienen cierta universalidad pueden realizar operaciones lógicas arbitrarias relativamente complejas, así como el almacenamiento de datos.  
  
Las FPGAs o Field Programable Gate Array son circuitos integrados que contienen un arreglo de bloques lógicos con interconexiones programables a su vez.  
El usuario tiene la capacidad de programar tanto las funciones realizadas por cada bloque lógico como las conexiones entre los bloques.

En su interior se distinguen tres elementos básicos, Bloques Lógicos, Bloques de Entrada/Salida y las Interconexiones.

Tabla

Descripción generada automáticamente

* Bloque Lógicos: Dependiendo del fabricante y el modelo de FPGA estos pueden incluir desde LuTs, multiplexores, compuertas lógicas o flip-flops, pudiendo llegar alguno de ellos a solo contener pares de transistores.
* Las interconexiones programables entre los distintos bloques lógicos pueden variar a su vez dependiendo del modelo de FPGA utilizado destacando dos tipos:  
  Las matrices de switches que se encuentran entre cada intersección de las rutas entre bloques, estas soportan cualquier configuración en su conexión sin embargo es una tecnología costosa con el inconveniente de que no se pueden realizar todas las conexiones posibles en un mismo tiempo.  
    
  Conexión a Bloques Lógicos adyacentes. A diferencia de las conexiones con las matrices de switches estas últimas son más rápidas al no tener que pasar por matrices de ruteo.  
  Las conexiones generalmente se dan con los cuatro bloques adyacentes al bloque lógico, aunque en algunos casos se pueden conectar a ocho bloques incluyendo sus bloques en diagonal.
* Los Bloques de entrada/salida permiten conectar la lógica interna de la FPGA al medio externo.  
  Estos bloques pueden ser configurados como entradas, salidas y entrada/salida gracias a un buffer triestado.  
  A su vez contienen flip-flops que permiten almacenar el valor de entrada o de salida.

Los FPGA más modernos incluyen además de estos bloques básicos otros recursos como DSPs los cuales permiten realizar operaciones de suma, multiplicación, multiplicaciones acumuladas y otras. Bloques de memoria comúnmente llamados BRAM, unidades dedicadas a la gestión de relojes, transceptores de alta velocidad y núcleos IPs que permiten concluir infinidad de tareas.

* Comparativa

Como se puede apreciar el concepto de SoC es amplio, en algunos casos no se puede apreciar la diferencia entre dispositivos ASIC ,ASSP y los SoCs basados en esa tecnología.  
Como regla general se consideran como SoCs a las ASIC y ASSP cuando estas últimas incluyen uno o varios procesadores.[6].

Diagrama

Descripción generada automáticamente

Tabla

Descripción generada automáticamenteRealizar una comparación entre los principales dispositivos basados en silicio en función de su consumo energético, rendimiento y costes es una tarea compleja. En el caso de agruparlas en tres grupos. ASICs/ASSPs , SoCs y FPGAs para el caso de una aplicación concreta comparando entre ellas las implicaciones de consumo, rendimiento, flexibilidad y área se podrían estimar de la siguiente forma.[7]

## SOCs en FPGA

En las recientes décadas, la industria del semiconductor lleva realizando a crecimiento continuo dispositivos de mayor rendimiento y mayor eficiencia energética.  
Con la desaceleración de la ley de Moore, esto ha provocado que los desarrolladores de sistemas deban esperar para obtener nuevas generaciones de dispositivos con mayores prestaciones.  
Este cambio de tendencia supuso la apertura a un nuevo de paradigma y enfoque en el desarrollo de dispositivos, orientando estos a los hardware reconfigurables (mayoritariamente basados en tecnología FPGA).   
A pesar de la variedad de arquitecturas en el mercado basadas en software y hardware presentes en el diseño de sistemas embebidos; tenemos por un lado las ASICs que proveen los mayores rendimientos actuales y en contrapuesto los Microcontroladores con soluciones de mayor flexibilidad.  
Por el contrario las FPGAs se sitúan en un término medio ofreciendo lo mejor de ambas partes. Sus capacidades de rendimiento y procesamiento son menores que las de una ASIC, pero si superan las de un MCU. Su flexibilidad es mayor que una ASIC gracias a los métodos de reconfiguración dinámica parcial o total pero menor que las de un MCU.[8]  
  
Con este giro de tendencia y la alta variabilidad de diseños presentes en el mercado se pueden dividir en dos grandes grupos: Los FPSoCs y los eFPGA SoCs.  
  
Diagrama

Descripción generada automáticamente

## FPSoCs

Los principales vendedores de FPGAs han empezado a integrar procesadores duros y blandos (hard/soft) dentro de sus productos. Los FPSoCs “Field-Programmable Systems-on-Chip” emergen como una de las mejores soluciones a medio camino entre rendimiento y flexibilidad.  
Gracias a ello las FPGAs han dejado de considerarse meros aceleradores hardware para pasar a ser plataformas SoCs de gran potencial.  
Intel FPGA, Xilinx AMD, Microsemi, QuickLogic o Lattice son algunas de las compañías en apostar por la siguiente vía dentro de los SoCs reconfigurables[8].

Imagen de la pantalla de un celular con letras

Descripción generada automáticamente con confianza media

Los recursos hardware en las FPGAs varían de forma muy notoria según el fabricante y el modelo del dispositivo.  
Además de los recursos habituales presentes en ellas bloques lógicos, bloques de entrada/salida, interconexiones, etc . Existen en estos nuevos productos orientados a los SoCs ,prestaciones no presentes en antiguas generaciones pero que las presentes si incluyen.  
  
Es el caso para los recursos analógicos, las antiguas FPGAs se encontraban carentes de dichos recursos en particular convertidores analógico-digital y digital-analógico (ADCs y DACs).  
  
Algunos de los principales recursos analógicos nuevos en las FPGAs actuales son los siguientes:[9]

* Los bucles de bloqueo de fase fraccionados (fPLL): Procedentes de Altera permiten implementar la síntesis de frecuencia fraccionada. Estos se consiguen gracias a un modulador delta sigma presente en el bucle de realimentación el cual puede ser controlado por señales externas, lo que le añade mayor flexibilidad.  
  Esta estructura mejora el rendimiento de los osciladores de referencia para las comunicaciones digitales. En muchos sistemas industriales actuales se requieren interfaces de comunicación fiables y de alta velocidad.
* Convertidores analógicos digitales: Las series 7 de Xilinx incluyen tecnología AMS (Analog Mixed Signal) que permiten la conversión y configuración de señales a través de los bloques XADC, incluyen 2 ADC de 12 bits y 1Msps, dos amplificadores de seguimiento y retención que permiten hacer muestreo diferencial y multiplexadores que facilitan el acceso a 17 canales.
* Motor de cálculo analógico (ACE): Las FPGAs Microsemi SmartFusion incluyen un bloque denominado ACE, capaz de controlar hasta tres ADCs de 12 bits y 600 ksps con muestreo y retención, así como tres DACs de 24 bits
* Procesadores Hardcore Vs Softcore

Diagrama

Descripción generada automáticamenteLos procesadores embebidos o hardcore principalmente procesadores ARM (Intel y Xilinx) o en el caso de Microsemi, algunos de sus dispositivos incluyen algunos Cortex-M3.   
La adición de estos dispositivos a las FPGAs ha llevado al desarrollo de diferentes arquitecturas, actualmente existen dos implementaciones populares que las empresas están siguiendo para producir estos dispositivos [7].

Tabla

Descripción generada automáticamente con confianza media  
La primera opción (izquierda) consiste en desarrollar un dispositivo SoC-FPGA integrado en una sola matriz con el dispositivo dividido en una parte de FPGA y una parte de procesador más el subsistema del procesador.  
La segunda opción (derecha) consiste en colocar el SoC y la FPGA uno al lado del otro como dispositivos discretos, conectarlos y alojarlos en un único paquete MCM (Módulo multichip).  
Tanto en los dispositivos de Intel-Altera y Xilinx, el procesador y la parte reconfigurable de la FPGA son alimentados de forma independiente, es posible desactivar uno u otro con el fin de reducir el consumo.[9]

Además de los procesadores duros algunos fabricantes de FPGA proveen a su vez procesadores blandos (softcore). Es el caso de Xilinx con el microblaze o picoblaze e Intel-Altera con el NIOS II. Existen a su vez multitud de procesadores desarrollados por terceros y disponibles para incorporar según los requisitos del proyecto.

¿Qué es mejor, un procesador softcore o un procesador embebido hardcore? La respuesta, no es directa. Para poder elegir entre un modelo de core u otro se deben analizar los requisitos de diseño que se quiere implementar. ¿Cuáles son las prestaciones que más interesan en él diseño? Velocidad, recursos ocupados y consumo son los factores que determinan la elección.

Calendario

Descripción generada automáticamenteLos procesadores duros superan ampliamente en términos de velocidad sus homólogos blandos al no estar estos primeros limitados por las características físicas de la FPGA. El procesador duro existe como un chip único integrado dentro de la FPGA esto se ve reflejado en el uso de espacio. Los procesadores blandos utilizan los recursos físicos de la FPGA para poder ser desplegados. Sin embargo, las altas prestaciones en velocidad de los hardcores se resienten en un mayor consumo energético. Además, como contrapartida al estar integrado en un chip físico dentro de la FGPA su flexibilidad en los diseños es muy baja siendo los procesadores softcore más fácilmente adaptables a modificaciones.[10]

## eFPGAs en SoCs

Una FPGA embebida (eFPGA) es un núcleo IP que puede integrarse dentro de un dispositivo ASIC o SoC para obtener los beneficios de su lógica programable con mejora de latencia, rendimientos y consumo energético.   
  
Como ya sea ha mencionado las FPGAs son conocidas por su flexibilidad y sencillez en los cambios de diseño. Con los continuos avances y la regla de Moore estos dispositivos se han convertido en una alternativa para el despliegue de SoCs directamente sobre ellas.  
Sin embargo, las FPGAs tiene unas características de “silicio” en término de área, potencia y velocidad con respecto a las ASICs.  
Efectivamente el impacto positivo de las cualidades de una FPGA se ven afectado por algunas desventajas del uso de dicha tecnología que son las medidas punitivas de rendimiento y sobrecarga de área [11]. Se puede considerar que una FPGA consume de media 12 veces más potencia dinámica que una ASIC equivalente, es unas 40 veces más grande en área y unas 3,2 veces más lenta comparada con las ASICs [12] .  
A esta situación se le suma una problemática inherente que afecta de forma sustancial al coste de desarrollo de SoCs. La detección de errores de diseño después de la fabricación. Estos errores pueden deberse a fallos no encontrados durante el proceso de simulación o cambios en los requisitos y especificaciones de diseño.[13]

Por lo tanto, la solución adoptada por los desarrolladores es la incorporación de núcleos lógicos programables basados en la tecnología FPGA en forma de IP embebidos en el SoC que permitan dotar de cierta flexibilidad sus diseños y solventar posibles errores o cambios en el diseño después de su fabricación.

Diagrama, Esquemático

Descripción generada automáticamenteLa dos arquitecturas y topologías más populares de las FPGAs y que por lo tanto son la base de las eFPGAs son: Mesh-based Interconnect y Tree-based Interconnect.

Las arquitecturas Mesh-based Interconect (basadas en malla), los LBs se colocan en una cuadrícula 2D y están rodeados de canales de enrutamiento, las interconexiones de enrutamiento están formadas por bloques de conmutación (CBs) y segmentos de cable (SBs). Los bloques CB conectan los bloques lógicos con los canales adyacentes. Los bloques SBs controlan las conexiones entre los enrutados verticales y horizontales.

Por otro lado, la arquitectura Tree-based Interconnect (basadas en árbol o también llamadas jerárquicas multinivel), en este caso se organizan los bloques lógicos en clusters separados y conectados de forma recursiva para formar una estructura de apariencia jerárquica.  
Solamente las arquitecturas con más de 2 niveles de jerarquía se consideran jerarquías multinivel.  
Cada estructura tiene sus ventajas. Los modelos basados en estructura jerárquica están diseñados para maximizar el uso de la lógica, explotando la ubicación de las conexiones, otorgando mayor rendimiento y prestaciones temporales. En la estructura basada en árbol, el número de interruptores en serie utilizados para conectar dos LBs aumenta como una función logarítmica de la distancia d de Manhattan mientras que el número de segmentos en serie aumenta linealmente con d para la estructura de malla.  
Sin embargo, el retardo en cables aumenta exponencialmente a mayores niveles jerárquicos empleados, por lo tanto, el uso de altos niveles jeráquicos en las FPGAs basadas en esta arquitectura pueden disminuir su rendimiento.  
El modelo en malla es más escalable al tener una estructura regular.[11]

## Buses de comunicación On-Chip La arquitectura AMBA.

Diagrama

Descripción generada automáticamenteLa entrada de los circuitos integrados en la era de los SoC, los cuales se caracterizan como se ha visto en la integración de una gran cantidad de componentes distintos en un mismo chip; CPUs, variados IPs de bloques Lógicos, Bloques de Memorias, circuitos con complejas técnicas de multiplexado, periféricos, etc [14].

Esto produce que el tamaño del diseño se incremente cada vez más y ya no sea posible realizar el desarrollo entero del proyecto debido a los costes de tiempo y recursos, es por ello por lo que se hace inevitable el incremento del uso de IPs. Gracias a la incorporación de estos bloques se incrementa la velocidad en el diseño.   
Sin embargo, surge un problema, cada bloque por separado puede presentar interfaces de comunicación distintas al proceder de fabricantes distintos.  
  
Todo ello resultó en la necesidad de la creación de una arquitectura de comunicación estandarizada que permitiera la integración correcta de distintos IPs en el mismo chip. [15]  
Con este propósito han ido surgiendo distintas arquitecturas para regular la comunicación en los diseños Soc.  
Algunas de las arquitecturas desarrolladas son: ARM Microcontroller Bus Architecture (AMBA), IBM Core Connect, OpenCores Wishborn , Altera Avalon y SiliconBlackplane de SONY . [16][17]

De todos los buses On-Chip (OCB) que han sido desarrollados en el mercado uno de aquellos que se ha proclamado como un standard de facto es el bus AMBA 4.0 introducido por ARM en 2010.

## Arquitectura AMBA

El “*Advanced Microcontroller Bus Architecture*” o bus AMBA introduce 5 buses/interfaces: Advanced eXtensible Interface (AXI),Advanced High Performance Bus (AHB), Advanced Peripheral Bus (APB) y el Advanced Trace Bus (ATB) [18].

Gráfico

Descripción generada automáticamenteDesde su aparición en 1990 han ido sucediéndose numerosas versiones de la arquitectura con el fin de responder a la demanda de nuevos procesadores y tecnologías del mercado llegando hasta nuestros días con la versión 5.0.

Toda la configuración estructural, las señales y la transferencia de módulos se encuentra definida por la especificación AMBA.  
  
**Advanced System Bus (ASB)**.  
Es un bus que incorpora la arquitectura Pipeline, soportando múltiples maestros.  
Su modo standard de operación se encuentra caracterizado por la figura del árbitro (arbiter) y el decodificador. El árbitro decide que maestro de aquellos que solicitan acceso al bus tiene mayor prioridad. Una vez determinado, el maestro seleccionado inicia la transferencia.   
La figura del decodificador selecciona la dirección del bus esclavo y este último realiza una respuesta al bus maestro.  
Una vez realizada esta operación, los datos son transmitidos entre maestro y esclavo. [19]

Este bus se caracteriza por tener unas altas prestaciones en el diseño con microcontroladores embebidos de 16 y 32 bits, es por ello por lo que soporta correctamente la conexión a memorias On-chip, procesadores o a su vez con memorias externas.  
  
Esta arquitectura aparecida con la primera versión de AMBA en 1990 ha sido poco a poco remplazada por versiones más modernas de buses dentro de la arquitectura.

**Advanced High Performance Bus (AHB)**  
Este bus surge más tarde que el bus ASB e igual que este último es un bus de altas prestaciones incorporando también operaciones de Pipeline.  
Soporta múltiples maestros y operaciones con alto ancho de banda.  
Este sistema se utiliza típicamente con un procesador y la interfaz de prueba sin embargo, es común añadir como buses maestros accesos directos a memoria (DMA) o algún tipo de procesador digital (DSP).

**Advanced Peripheral Bus (APB).**

Se ha diseño con el objetivo de minimizar al máximo la complejidad de su interfaz y reducir al mínimo su consumo energético.  
Su uso habitual es de interfaz de cualquier periférico que requiere un ancho de banda pequeño.  
Este bus sigue usándose hoy en día en gran medida a diferencia del ASB.  
Las principales ventajas aportadas de incorporar el bus APB en los diseños son las siguientes:

* Uso en dispositivos de baja velocidad como bus periférico.
* Es síncrono.
* Soporta un solo maestro y no tiene estructura pipeline.

Es típico el uso combinado de varios buses dentro del mismo chip, para ello con el fin de poder sincronizar los datos entre buses se utilizan puentes (bridge) que permiten “traducir” la información de un protocolo a otro.  
En la siguiente imagen se muestra una organización típica en un SoC, en el cual podrían verse envueltos dos de los buses mencionados.  
  
Diagrama

Descripción generada automáticamente

Como se ha mencionado anteriormente el bus APB realiza las funciones de bajo consumo con dispositivos periféricos, por otro lado, la arquitectura de comunicación utilizada para conectar el procesador con memorias y DMA se realiza con un bus de mayores prestaciones como podría ser el caso de AHB o el ASB.

**Advanced eXtensible Interface (AXI).**

Unos de los buses más extendidos y conocidos de la arquitectura AMBA es el famoso bus AXI. Introducido en la versión 3.0 y ampliado en las sucesivas versiones 4.0 y 5.0. goza de un particular aprecio a la hora utilizarse en el diseño de SoCs.

Estos días prácticamente todos los IPs utilizados en Xilinx hacen uso de esta arquitectura.  
Los procesadores Zynq, Zynq MP, Microblaze y Versal todos ellos utilizan interfaz AXI.[20]

Como se ha mencionado anteriormente el AHB es un bus de un único canal soportando múltiples maestros y esclavos para el intercambio de información. Con un árbitro seleccionando el maestro más válido y un decodificador jerarquizando la lista de esclavos disponibles.  
El bus AXI nace con la misma filosofía sin embargo a diferencia de los anteriores presenta varios canales dedicados a las operaciones de lectura y escritura.[21]  
Esta especificación define tres protocolos concretos: [20] [22]

* AXI4: Es una interfaz de direcciones y datos mapeados en memorias de alto rendimiento. Tiene la capacidad de realizar accesos en modo ráfaga (burst) a dispositivos mapeados en memoria. Su uso es habitual para memorias de alto rendimiento.
* AXI4-Lite: Es una derivación simplificada del protocolo AXI4. Su interfaz es más sencilla y carece de capacidad para realizar acceso en modo ráfaga. Su uso típico es para comunicaciones simples asignadas en memorias de bajo rendimiento, en registros de estado y control.
* Diagrama

  Descripción generada automáticamenteAXI4-Stream: Es un protocolo unidireccional orientado de maestro a esclavo, reservado para la transmisión de datos a alta velocidad.

## Aplicaciones de los SOCs FPGA en la Industria y aportación a los ODS.

PENDIENTE ACABAR ESTE APARTADO ESTADO DEL ARTE.

# Entorno de Trabajo

En este apartado se va a abordar el entorno en el cual se han desarrollado los objetivos de este TFG, centrándose en describir las herramientas software que han permitido el desarrollo de las distintas etapas del proceso.

# Herramientas de desarrollo SW/HW Xilinx

Los fabricantes de FPGA ofrecen además de sus dispositivos, herramientas diseñadas y orientadas para la programación y despliegue de diseños en sus propios productos.  
Para este proyecto al utilizarse una FPGA de la empresa Xilinx se utilizará el entorno de desarrollo de dicha empresa.

Vivado Design Suite aparece en 2012 como un entorno cuyo propósito era el desarrollo integrado. Recientemente la compañía ha lanzado una nueva plataforma, Vitis, que posteriormente también incluyó Vivado. Ambas herramientas permiten crear diseños que se ejecutan en FPGA.  
La aparición de Vitis en escena ofreció la posibilidad por un lado de acercar la programación de FPGAs a mayor cantidad de programadores alejando esta última de los lenguajes de bajo nivel como Verilog y VHDL. Es decir, con sus nuevas funciones de HLS permite la programación de bloques con C/C++ que pueden posteriormente integrarse a bajo nivel con Vivado.  
En contrapartida su uso para la programación secuencial en C/C++ de los procesadores presentes en el diseño.

En base a lo mencionado anteriormente, las herramientas de Xilinx utilizadas para este proyecto son las siguientes:

* *Vivado*: Utilizado para la programación en VHDL del hardware y la integración de un SoC incluyendo un procesador softcore.
* *Vivado IP Packager :* Herramienta disponible dentro de Vivado, permite el desarrollo y empaquetado de módulos IPs. Su interfaz es similar a la disponible en Vivado sin embargo incluye la posibilidad de generar una estructura de documentos exportable a otros proyectos en formato IP.
* *Xilinx Vitis:* Antiguo “Xilinx SDK”, se programa C/C++ para ejecutar dentro de un procesador en un diseño creado en Vivado. Este código habitualmente acaba, parcialmente, por configurar y controlar ciertos elementos del hardware.

# Motores sin escobillas (Brushless)

En el siguiente apartado y coincidiendo con uno de los objetivos del TFG, se va a realizar una introducción al funcionamiento de los motores brushless. Con el fin, de transmitir aquellos conceptos necesarios para su control y alimentación.

# Control y alimentación de los motores sin escobillas.

Los motores sin escobillas se caracterizan por tener una alimentación diferente a los motores de CC con escobillas.  
Mientras que para estos últimos la excitación del motor se realiza aplicando una diferencia de potencial en sus bornas. Los motores sin escobillas “brushless” tienen la peculiaridad de necesitar un control en la alimentación de sus bobinas con el objetivo de hacer girar su rotor.

# Desarrollo y creación de un SOC en FPGA

El siguiente apartado y núcleo de este proyecto aborda las fases realizadas desde el diseño hasta su consecución de un SoC en un FPGA con el uso de las herramientas de Xilinx.

# Planificación.

El desarrollo de un IP, su integración en un SoC y posterior programación a alto nivel es una tarea compleja la cual requiere de una planificación minuciosa en el diseño de las distintas fases del proceso. Esto es debido a la combinación de programación Hardware con programación Software. Los errores pueden resultar en cuellos de botella muy grandes durante las fases de pruebas acarreando retrasos altos.  
  
Las fases del proceso desde su inicio hasta consecución son las siguientes.

1. Fase de diseño general.
2. Desarrollo IP
   1. Diseño
   2. Programación Hardware
   3. Integración y empaquetado del hardware en IP
3. Desarrollo e integración del IP en un SoC.
4. Desarrollo Software.
5. Despliegue.

# Fase de diseño general.

El objetivo de esta fase es planificar correctamente cada parte a fin de poder realizar correctamente la integración del sistema.  
Esta tarea es compleja debido a la gran cantidad de elementos que intervienen desde la programación individual de módulos, el uso de IPs externos y la alta cantidad de señales.

Cada fase del proyecto debe tener su propia etapa de diseño, sin embargo, con el objetivo de abarcar todo el proyecto el diseño general de este mismo resulta en el siguiente.

Diagrama

Descripción generada automáticamente

Como se puede apreciar la imagen del diseño general está simplificada con el objetivo de no cargar el esquema con elementos menores. Se han seleccionado varios bloques principales, con las entradas y salidas de mayor importancia.

Bloques

* IP Controlador Motor: Este bloque representa el IP que gestionará el control del motor sin escobillas, en su interior se concentra toda la lógica programada en hardware necesaria para generar las señales de control del motor.
* Procesador: Este bloque representa el procesador (Microblaze) embebido en la FPGA.
* Bloques Secundarios: Este bloque representa todos aquellos elementos secundarios necesarios para el correcto funcionamiento de los dos bloques mencionados anteriormente, a fin de simplificar la imagen, como lo son elementos intermedios de comunicación AXI, elementos de memoria y generadores de reloj.

Señales

* Señales de Salidas Externas: Estas señales salen directamente del IP sin interaccionar con demás elementos del SoC son las señales de control del motor además de señales que facilitan tareas de depuración durante las pruebas posteriores.
* Señales de Entradas Externas: Estas señales al igual que las anteriores descritas entran directamente al IP sin interaccionar con elementos del SoC. Son señales de los sensores HALL del motor. Serán filtradas dentro del IP a fin de aislar este último en mayor medida del exterior.
* Salidas uP Externas: Esta salida principalmente corresponde a la interacción del procesador con el exterior. En este caso será comunicación serial UART.  
  Su salida no es directa deberá pasar por elementos como los bloques secundarios.
* Señales Entradas Comunes: Estas señales hacen referencia a la señal de reloj interna de la FPGA y el RESET general. Al igual que las señales de salida del procesador su interacción no es directa con los bloques procesador e IP, sino que deberán pasar a través de bloques secundarios.

Los elementos del SoC generados y la programación sw del procesador dependerán en gran medida de las funcionalidades del bloque IP.

# Desarrollo IP

Este apartado contiene el procedimiento seguido para el desarrollo de un IP desde su concepción inicial, programación, simulación y posterior empaquetado.

# Diseño.

El objetivo principal del IP a desarrollar es el control de la alimentación de un motor sin escobillas.  
Las funcionalidades que se definen a continuación van a determinar las características del IP desde sus registros, entradas y salidas.

Funcionalidades:

* 2 modos de funcionamiento:
  + *Modo Controlador PI*: El IP realiza el control del motor sin intervención externa a excepción de configuraciones básicas: Sentido de giro, constantes, Referencia (Velocidad deseada).
  + *Modo Lazo Abierto*: El IP realiza el control de la alimentación del motor, sin realizar control sobre su velocidad. Esto conlleva que se deba proporcionarle el ciclo de trabajo de los PWM para regular la velocidad de forma manual.
* *Salida por 4 display de 7 segmentos*: Se pretende que la velocidad calculada en RPM pueda ser mostrada a través de 4 displays de 7 segmentos.
* *Generador de interrupciones:* Con el objetivo de mejorar las prestaciones del IP es apropiado añadir un módulo de interrupción que permita avisar a otros elementos del sistema el momento en el que se dé una actualización de la velocidad en los sensores.

En base a las funcionalidades concebidas, se definen 4 módulos. Un módulo de control (Controlador PI), un módulo de alimentación (Lazo Abierto), módulo de salida de 4 displays de 7 segmentos y un módulo generador de interrupciones.

Diagrama

Descripción generada automáticamente

Las entradas generales corresponden a las señales generales de reloj (CLK) y señal de Reset General, se aprecia a su vez el bus AXI y el módulo de comunicación AXI comunicado con 3 módulos del IP.  
El módulo de comunicación AXI y la gestión de sus registros con los demás módulos del IP se gestionará en el apartado de integración del IP.

Quedando definidas las funcionalidades del IP se pueden empezar a realizar la programación en VHDL de los distintos 4 módulos concebidos.

# Programación Hardware.

La estrategia empleada para programar los módulos mencionados en el apartado anterior es mediante un acercamiento Top-Down.

Diagrama

Descripción generada automáticamenteTop-Down: La metodología Top-Down se basa en el paradigma de “Dividir y Vencer” el cual se enfoca en dividir un problema principal en un conjunto de sub-problemas y a su vez dividir estos mismos en sub-problemas.  
El uso de esta metodología permite centrarse en tareas individuales para posteriormente interconectarlas entre ellas con el fin de resolver tareas de mayor complejidad.

Esta filosofía permite el desarrollo de módulos con alta cohesión con el problema que buscan resolver, pero con alta independencia con respecto a otros módulos. Esto último permite su reutilización en otros proyectos o partes del sistema.

En base a esta metodología el planteamiento de programación de los 4 módulos Controlador, Lazo, Display e Interrupción es el siguiente.

Diagrama

Descripción generada automáticamente

Diagrama

Descripción generada automáticamente

Diagrama

Descripción generada automáticamente

Diagrama

Descripción generada automáticamente

Tanto en el Controlador como en el Lazo Abierto, se puede observar en ellos que se repiten los mismos módulos a excepción del PID y SAMPLE. El enfoque orientado a programación modular va a permitir reutilizar los submódulos programados para ambos diseños, sin realizar ninguna modificación.   
A continuación, se van a describir las tareas que realizan cada submódulo junto a sus simulaciones. Esta fase programación y simulación se realiza en Vivado.

# Filtros HALL

Diagrama

Descripción generada automáticamente

La tarea de este módulo consiste en filtrar las señales asíncronas entrantes procedentes de los sensores HALL.  
El submódulo Syncro se ha posicionado en paralelo a la lógica desarrollada para el Debouncer debido a que ambos se encuentran declarados dentro de la misma arquitectura y no son independientes uno de otro.  
  
La tarea del sincronizador permite solventar el problema de las señales asíncronas entrantes. En un sistema síncrono, se asume que la frecuencia de las señales entrantes a los registros flip-flop es menor que la señal de reloj. Sin embargo, cuando las señales entrantes al flip-flop violan su tiempo de setup o hold no se puede predecir correctamente el valor de salida capturado, pudiendo entrar en un estado de meta-estabilidad.  
Un método para incrementar la resistencia a estos fallos son los dispositivos llamados sincronizadores. Los más sencillos consisten en crear una cadena de biestables en la cual la salida de un flip-flop es la entrada del siguiente. La longitud de la cadena no es mayor de 2 o 3 biestables.  
Un aspecto negativo de esta técnica es que aporta retraso al sistema.  
  
Una vez sincronizada la señal se pasa su valor al submódulo Debouncer (antirebotes). La señal de los sensores HALL al pasar de valor activo a nulo puede sufrir rebotes debido a ruido o el tiempo en el que tarda en estabilizarse, los cuales pueden acarrear mal funcionamiento en el sistema.  
Para ello el detector se encarga de fijar mediante un biestable el valor de la entrada y comparar durante x ciclos de reloj. En caso de mantenerse el valor de la entrada estable esta es pasada al registro de salida del filtro en caso contrario se aloja el nuevo valor de entrada y se reinicia la cuenta de ciclos de comprobación.

Interfaz de usuario gráfica

Descripción generada automáticamenteEste módulo permite configurar los x ciclos de comprobación, estando definido este valor como genérico en su declaración.

En la siguiente imagen se aprecia como ante una entrada asíncrona, se sincroniza (SYNC\_OUT) con 2 ciclos de delay. Por otro lado, gracias al registro (previnput) la entrada previa es comparada con la actual, iniciando el contador en caso de no coincidir. Si el contador no llega a los X ciclos definidos, en este caso 10, se reinicia. Finalmente, la señal de salida cambia al no recibir ningún cambio.

# PWM

En el apartado XXXXXX se expuso los distintos métodos de control y alimentación un motor Brushless. Para el caso de este IP, mediante la realimentación de la posición del rotor detectada a través de los sensores HALL, se activan las distintas partes del puente inversor con el fin de realizar la correcta excitación de sus devanados. El grado de excitación de estos últimos vendrá determinado por el ciclo de trabajo de la señal PWM de los transistores.

Diagrama

Descripción generada automáticamenteCon estas premisas se puede resolver la cuestión del control de la alimentación mediante la creación de dos módulos.  
Un módulo que genere señales PWM y un módulo decodificador que permita determinar que transistores activar y desactivar en función de la realimentación de los sensores HALL.

# Generador PWM

El siguiente módulo se encarga de generar una señal PWM en función del ciclo de trabajo asignado.

Su funcionamiento es el habitual para la generación de dichas señales. Un contador inicia una cuenta, al llegar está a su máximo o mínimo sea la cuenta ascendente o descendente se reinicia el contador. El valor del ciclo de trabajo entra en acción cuando el contador llega al valor estipulado por este en la cuenta. En su caso si inicia con valor lógico 1, convertirá su valor al opuesto es decir 0. Este valor se mantiene hasta llegar al final del contador y este se reinicie volviendo a dar una salida a 1.

Gráfico de líneas

Descripción generada automáticamente

Sin embargo, para el caso de este generador de PWM, se le ha programado la capacidad de poder generar una señal complementaria.  
Como se expuso en el apartado XXXXX se puede realizar el control del puente generando una señal de PWM en los transistores superiores. Cuando la señal del transistor superior está apagada se puede generar una señal opuesta en el transistor inferior de la fase del inversor.

Diagrama

Descripción generada automáticamenteLa activación complementaria no se puede realizar de forma directa al apagar la señal superior ya que se debe respetar tiempo de “DeadBand”. Este tiempo de seguridad permite cerrarse al transistor superior antes de la activación de su opuesto inferior evitando cortocircuitos.

Por lo tanto, el módulo programado permite generar una señal de PWM única o con su correspondiente señal complementaria.  
Se puede configurar el Deadband para que su duración sean los x siglos deseados.  
Por último la frecuencia de PWM puede ser configurada para funcionar en un rango de funcionamiento de 40KHz-100KHz.  
La frecuencia, Deadband y el tipo de señal simple o con su parte complementaria son definidas como genéricos en la declaración del componente.

Interfaz de usuario gráfica

Descripción generada automáticamente

Pantalla de un video juego

Descripción generada automáticamente con confianza media

Imagen que contiene Diagrama

Descripción generada automáticamenteEl PWM mostrado en las dos imágenes anteriores corresponde a una frecuencia de 100KHz y para un ciclo de trabajo de 50%. Con modo complementario activado y un deadband de 4 ciclos se observa como las salidas PWM\_H (PWM alto) y PWM\_L se encuentran espaciadas por cuatro ciclos de reloj.

Con el modo Complementario desactivado se aprecia como la única señal en realizar el PWM es la salida PWM\_H, la salida de PWM\_L permanece desactivada de forma constante.

AXI-Lite

Debido a la temática del TFG, se va a profundizar en el funcionamiento básico del protocolo AXI-Lite.  
Al igual que su homólogo AXI4 el protocolo AXI4-Lite consta de cinco canales. Dos canales de lectura (Read Address y Read Data) y tres canales de escritura (Write Address,Write Data y Write Response).   
  
Diagrama

Descripción generada automáticamente

Interfaz de usuario gráfica, Aplicación

Descripción generada automáticamenteLa figura anterior muestra el esquema de comunicación del protocolo AXI4, el protocolo Lite es idéntico con la diferencia principal como se ha mencionado anteriormente de no poder realizar transmisión en ráfaga.  
A pesar de ser un derivado del bus AXI4 para poder realizar comunicación entre ambos se necesitan realizar conversiones para permitir comunicación entre AXI4-AXI4Lite.  
Se puede resolver dicha problemática con el uso de un puente (bridge) entre ambos protocolos o se puede definir un esclavo AXI4-Lite que incluya lógica de reflexión de ID. Esto permite evitar el uso de puentes e integrar este en un sistema AXI completo con la garantía de que se accede al esclavo mediante transacciones que cumplen con el subconjunto del protocolo AXI4-Lite.[23]

En el cuadro de señales asociadas se pueden apreciar en cada uno de los cinco canales unas señales de VALID y otra señal de READY, ello es debido al proceso de “handshake” (apretón de manos). Este mecanismo doble permite tanto al maestro como al esclavo realizar un control sobre la información que se mueve entre ambos.  
La fuente emisora de información genera la señal VALID para indicar que la dirección, dato o control de la información está disponible. Por el contrario, el receptor genera una señal de READY la cual indica que puede aceptar la información. El apretón de manos se realiza cuando tanto la señal de VALID y READY de un mismo canal son asignadas durante un flanco de subida de reloj.[22]

* **Proceso de lectura:**

Tabla

Descripción generada automáticamente

1. La secuencia de lectura de un registro del dispositivo esclavo comienza por el maestro colocando la dirección del registro en el canal de lectura de dirección (Read Address Channel) a la vez que asigna nivel ARVALID, indicando por lo tanto que la dirección en ese canal es válida.
2. A su vez RREADY indica que el maestro esta listo para leer datos del esclavo.  
   El esclavo indica a su vez mediante la señal ARREADY que está disponible para recibir la dirección.
3. A partir del momento en el que ARVALID y ARREADY están activadas en el siguiente flanco de subida de reloj se produce el apretón de manos (handshake). Por lo tanto, el esclavo ya ha recibido la dirección del registro. Una vez ocurrido este proceso tanto maestro como esclavo desenclavan a nivel bajo las señales de ARVALID y ARREADY. El esclavo ya ha recibido la direccion.
4. El esclavo coloca la información del registro requerido en el canal de escritura (Read Data Channel) y activa la señal de RVALID indicando nuevamente que el dato en el canal de lectura de datos es válido. Finalmente, en el siguiente flanco de subida del reloj se desactivan las señales RREADY y RVALID.

* Imagen que contiene Tabla

  Descripción generada automáticamente**Proceso de escritura:**

1. El maestro introduce tanto en el canal de escritura y lectura (Write Adress Channel y Write Data Channel) la dirección y dato a transmitir.  
   En paralelo activa las señales de AWVALID y WVALID indicando al esclavo la validez de los datos y la disponibilidad de una respuesta por parte del esclavo. El maestro también activa la señal BREADY del canal de respuesta a la escritura (Write Response Channel).
2. El esclavo a su vez activa las señales de AWREADY y WREADY.
3. Se produce un doble apretón de manos (handshake) tanto en el canal de direcciones como de datos. En el siguiente flanco de reloj se desactivan las señales AWREADY, AWVALID, WVALID y WREADY.
4. Finalmente, el esclavo responde activando BVALID indicando por lo tanto que la transacción ha sido correcta. En el siguiente flanco positivo de reloj ambas señales se desactivan.

REGISTROS IP CREADO

# Mapa de registros AXI4-Lite del IP creado.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Nombre | Tipo | Direcciones Registros | | Defecto | Comentario |
| Hexadecimal | Binario |
| Reg0\_Star\_Stp | r/w | 0x00 | 00000000 | 0x00000000 | - |
| Reg1\_Const | r/w | 0x04 | 00000100 | 0x00000000 | - |
| Reg2\_ Dut\_SP | r/w | 0x08 | 00001000 | 0x00000000 | - |
| Reg3\_Hor\_AntH | r/w | 0x0C | 00001100 | 0x00000000 | - |
| Reg4\_InVel | r | 0x10 | 10000000 | 0x00000000 | - |
| Reg5\_OutVel | r/w | 0x14 | 10000100 | 0x00000000 | - |

Descripcion de registros.

Dependiendo del modo de funcionamiento escogido los registros pueden variar en su funcionalidad interna.

**Reg0\_Star\_Stp**

Registro de Start Stop dedicado a gestionar el encendido o apagado (r/w).

|  |
| --- |
| Star\_Stp |

|  |  |
| --- | --- |
| Star\_Stp [31-0] | Habilita Start/Stop, permite encender o apagar el módulo de control sin utilizar el RESET general.  (0x00000000: Stop; 0xFFFFFFFF: Start). Si no se introduce la combinación correcta por defecto se activa el Stop. Valor por defecto: 0x00000000. |

**Reg1\_Const**

**Modo Controlador**

Registro de Constantes dedicado a gestionar la configuración desde SW/HW de las constantes del controlador PI (r/w).

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| FlagKp | FlagKi | ------------------------------------ | KP | KI |

|  |  |
| --- | --- |
| FlagKp | Habilita el uso de la constante KP [7:0] para ser usada por el controlador.  Valor por defecto: 0. |
| FlagKi | Habilita el uso de la constante KI [7:0] para ser usada por el controlador.  Valor por defecto: 0. |
| -------- | Espacio sin uso. |
| KP [7:0] | Constante proporcional. Se activa con FlagKp.  Valor por defecto: 0x00. |
| KI [7:0] | Constante integral. Se activa con FlagKi. Valor por defecto: 0x00. |

**Modo Lazo Abierto**

|  |
| --- |
| -------------------------------------------- |

|  |  |
| --- | --- |
| ---------[31:0] | Este registro no tiene efecto sobre el funcionamiento del módulo.  Valor por defecto: 0x00000000. |

**Reg2\_ Dut\_SP**

**Configuración Modo Controlador**

Registro dedicado a gestionar la configuración de la referencia del controlador PI. (r/w)

|  |  |
| --- | --- |
| ------------------------------- | SP |

|  |  |
| --- | --- |
| SP[19:0] | Tiempo entre pulso con base a la frecuencia de reloj CLK.  Valor por defecto: 0x00000. |

**Configuración Modo Lazo Abierto**

Registro dedicado a gestionar la configuración de ciclo de trabajo (Duty) del módulo. (r/w)

|  |  |
| --- | --- |
| ------------------------------- | Dut |

|  |  |
| --- | --- |
| Dut[X:0] | Valor de ciclo en función de la frecuencia de PWM. Según la frecuencia escogida; 100KHz, 50KHz o 40KHz. El tamaño del registro puede ser [11:0], [10:00], [9:0].  100KHz(0% 0x000000; 100% 0x3E8);50KHz(0% 0x000000; 100% 0x7D0) 40KHz (0% 0x000000; 100% 0x9C4).  Valor por defecto: 0x00000. |
| ------- [31:X] | Registro no utilizado. |

**Reg3\_Hor\_AntH**Registro dedicado a gestionar la configuración de sentido de giro horario u antihorario. (r/w)

|  |
| --- |
| Hor\_AntiH |

|  |  |
| --- | --- |
| Hor\_AntiH [31:0] | Gestión del sentido de giro. (Horario: 0x00000000; Antihorario: 0xFFFFFFFF).  Valor por defecto: 0x00000000. |

**Reg4\_InVel**Registro dedicado a gestionar la lectura del tiempo entre pulsos de los sensores HALL. (r)

|  |  |
| --- | --- |
| -------------------------- | InVel |

|  |  |
| --- | --- |
| InVel [19:0] | Registro con tiempo entre pulsos de sensores HALL.  Valor por defecto. (0x0000FFFF). |
| ------[11:0] | Registro no utilizado. |

**Reg5\_OutVel**Registro dedicado a gestionar la comunicación al módulo de la velocidad calculada. (r/w)

|  |  |
| --- | --- |
| -------------------------- | OutVel |

|  |  |
| --- | --- |
| OutVel [12:0] | Registro con velocidad calculada.  Valor por defecto. (0x00000000). |
| ------[19:0] | Registro no utilizado. |

# Maqueta Demo Alimentación Motor Brushless.

En esta sección se procede a exponer el diseño y posterior desarrollo de la maqueta realizada para la alimentación de un motor sin escobillas con el fin de poder realizar ensayos y pruebas sobre este mismo.

## Diseño

Diagrama

Descripción generada automáticamenteComo ya se ha podido abordar en la cuestión anterior sobre la alimentación de motores brushless se procede a plantear un esquema general de los elementos presentes en la maqueta a realizar.  
Resultando en el siguiente diagrama en el cual se pueden apreciar claramente los principales elementos que intervendrán.  
  
  
En la siguiente figura se aprecian los tres principales componentes que intervendrán.

* **Motor Brushless**: Con sus tres fases de alimentación, este motor girará a las revoluciones deseadas en función de la alimentación recibida en sus bobinados.
* **Inversor Trifásico**: La etapa de potencia que gestionará la correcta alimentación del motor sin escobillas a partir de las señales de control (PWM).
* **FPGA**: Será la encargada de realizar las tareas de control del sistema recibiendo las señales de los sensores (efecto HALL) y generando señales de control (PWM) correspondientes para controlar el inversor.

Además de los principales componentes mencionados se deberán añadir otros secundarios que permitan el correcto funcionamiento y relación de los elementos principales entre sí.

## Componentes

En este apartado se enumeran aquellos componentes eléctricos utilizados para el desarrollo de la maqueta de pruebas.

### Un circuito electrónico azul Descripción generada automáticamente con confianza mediaBasys3 Artix-7 FPGA Board.

La Basys3 es una placa de desarrollo diseñada para ser utilizada de forma exclusiva con la herramienta Vivado Design Suite.  
Con su arquitectura de Artix-7 desarrollada por Xilinx, esta placa de desarrollo para aprendizajes dispone de una amplia colección de puertos de E/S con los cuales poder cumplir multitud de tareas.

Principales Características de la Artix-7 35T.

* 33,280 logic cells distribuidas en 5200 slices (cada slice contiene 6 LUTs y 8 flip-flops).
* 1,800 Kbits de BRAM.
* 5 posibles administraciones de reloj, cada uno con un su propio PLL.
* 90 DSP slices.
* La frecuencia de reloj alcanza los 450 MHz.
* Convertidor analógico-digital embebido (XADC).

### Inversor BOOSTXL-3PHGANINV

Un circuito electrónico

Descripción generada automáticamente con confianza baja

El inversor BOOSTXL-3PHGANINV permite trabajar a altas frecuencias de PWM gracias a la presencia en sus tres fases inversoras de drivers LMG5200 Gan de medio puente.  
Las principales motivaciones a la hora de elegir este inversor frente a los demás son las siguientes:

* Permite el control PWM del puente mediante señal de 3.3V, esto facilita mucho el montaje gracias a que se evita una etapa de elevación de nivel lógico 3.3V-5V.
* Su amplio rango de alimentación 12V-60V.
* La alta frecuencia de conmutación soportada.

Junto a las mencionadas anteriormente se pueden resumir en la siguiente tabla las principales características del inversor trifásico.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Parametros** | **Valores Típicos** | **Comentarios** |
| DC entrada voltaje | 48 V (12 to 60 V) | 80-V máximo absoluto |
| Corriente máxima de salida trifásica | 7ARMS (10-APEAK) por fase | - |
| Potencia máxima de entrada | 400 W (a 48 V) | - |
| Tipo FET de potencia | Tecnología GaN | Módulo de alimentación de medio puente con controladores de compuerta de lado alto y bajo integrados (LMG5200) |
| Frecuencia de conmutación PWM | 40 a 100 kHz | - |
| PWM deadband | 12.5 ns | - |
| Máxima eficiencia 100-kHz PWM | 98.5% | A 400-W potencia de entrada |
| Sensor y amplificador de corrientes de fase. | 5-mΩ shunt por INA240 | Amplificador diferencial de detección de corriente con 20 V/V y rechazo de PWM mejorado (INA240). |
| Rango máximo de corriente en fases. | ±16.5 A | Escalado de 0 a 3.3 V; invertido con polarización 1.65-V |
| Rango precisión de corrientes de fase (–25°C a 85°C) | ±0.5% (no calibrado), ±0.1% (calibrado) | Sobre rango nominal ±10 A; calibración única de compensación y ganancia 25ºC |
| Filtro de entrada y salida EMI | Externo | - |
| Pila de capas de la PCB | Cobre, cuatro capas de 70-µm | - |
| PCB tamaño | 53.4 mm × 78.9 mm | Dimensions in mil: 2105 mil × 3107 mil |
| Rango Temperatura | –40ºC a 85ºC |  |
| Alerta PCB exceso temperatura | > 85ºC | Configurable de 70ºC a 85ºC (TMP302B) |

Se aprecia que el inversor escogido tiene entre sus características la capacidad de medir la corriente en los devanados junto a filtros contra las interferencias producidas por la acción de las conmutaciones del PWM. Para el caso de esta demo no se hará uso de dichas características limitándose al control del puente mediante las señales PWM.

### Motor Brushless Modelo 2163788

Una consideración que se ha tenido en cuenta a la hora de escoger el motor, es el tener integrado en su estructura sensores HALL. Dicha consideración permite reducir etapas y conexionados en la maqueta al no depender de sensores externos al motor, los cuales además corren el riesgo de introducir ruido al sistema.

Imagen que contiene interior, cepillo de dientes, mostrador, tabla

Descripción generada automáticamente

Las características del motor sin escobillas y sus sensores integrados son las siguientes:

|  |  |
| --- | --- |
| **Parámetros** | **Valores** |
| N° polos | 8 |
| N° fases | 3 |
| Voltaje | 24 V |
| Revoluciones | 4800 rpm |
| Par promedio | 0,016 Nm |
| Máximo Par | 0,05 Nm |
| Constante de par | 0,036 Nm/A |
| Resistencia de línea | 5,1 Ω |
| Inductancia de línea | 3,3 mH |
| Corriente sin carga | 150 mA |
| Máxima corriente de pico | 1,4 A |
| Corriente media | 0,44 A |
| Longitud | 20 mm |
| Inercia del rotor | 6 g-cm² |
| Masa | 0,12 Kg |
| VCC Sensor HALL | +5 to +24 VDC |
| Ángulo sensores HALL | 120° |
| Salida del eje | 0,025 mm |
| Clase Aislamiento | B |
| Juego Radial (450 g carga) | 0,02 mm |
| Juego Axial (450 g carga) | 0,08 mm |
| Máxima fuerza radial (10 MM desde zona frontal) | 15N |
| Máxima fuerza axial | 10N |
| Resistencia dieléctrica | 600 VCA seg |
| Resistencia de aislamiento | 100 Mohm min. 500 VDC |

### Convertidor niveles lógicos bidireccional.

A diferencia del inversor que nos permite trabajar directamente con las salidas PWM de la FPGA a 3.3V. Las salidas de los sensores HALL son de 5V, se deben tratar dichas señales ya que la FPGA solo acepta entradas digitales de 3.3V.  
El dispositivo mostrado a continuación permite realizar la conversión de niveles lógicos de 3.3V a 5V y vicerversa.

Un conjunto de letras blancas en un fondo blanco

Descripción generada automáticamente con confianza media

Características:

|  |  |
| --- | --- |
| **Parámetros** | **Valores** |
| Voltaje Alto | 5v (2.8V) |
| Voltaje Bajo | 3.3V (1.8V) |
| N° Canales | 4 |
| Sentido | Bidireccional |

Fuentes de alimentación.Se han escogido las siguientes fuentes de alimentación para alimentar los dispositivos mencionados anteriormente.

#### Un circuito electrónico Descripción generada automáticamente con confianza bajaFuente de alimentación para board.

#### 

|  |  |
| --- | --- |
| **Parámetros** | **Valores** |
| VCC (Jack) | 6.5V-12V |
| N° Salidas | 2 |
| Voltaje Salida | 5V-3.3V-0(GND) |
| Corriente máxima | 700 mA |

#### Alimentación 12V

Un teléfono celular

Descripción generada automáticamente con confianza baja

|  |  |
| --- | --- |
| **Parámetros** | **Valores** |
| Entrada AC | 220V (50-60 Hz) |
| Salida DC | 1.5-12 V |
| Corriente máxima | 500 mA |

#### Alimentación 24V

|  |  |
| --- | --- |
| **Parámetros** | **Valores** |
| Entrada AC | 110-240V (50-60Hz) |
| Salida DC | 24 V |
| Corriente máxima | 2 A. |

Imagen que contiene interior, pequeño, tabla, teléfono

Descripción generada automáticamente

## Esquema Eléctrico

El esquema eléctrico general resultante de la unión de los distintos componentes mencionados, sin incluir las fuentes de alimentación, es el siguiente:

**Diagrama, Esquemático

Descripción generada automáticamente**

Se incluyen a continuación los esquemáticos de la etapa inversora (BOOSTXL-3PHGANINV) y convertidor de niveles lógicos (BOB- 12009).

* **BOOSTXL-3PHGANINV**

Diagrama, Esquemático

Descripción generada automáticamente3 Phase Inverter

Phase Current/Voltage Sense

Diagrama, Esquemático

Descripción generada automáticamente

PWM ENABLE.  
Diagrama, Esquemático

Descripción generada automáticamente

* BOB- 12009 (Niveles Lógicos 3.3V-5V).

Diagrama, Esquemático

Descripción generada automáticamente

## Montaje de la maqueta de pruebas.

En este apartado se va a realizar las imágenes del montaje definitivo de la maqueta de pruebas, se incluirá los planos de perfil y planta realizado con Autocad.  
No se realiza este apartado hasta los últimos momentos del TFG cuando se tendrá la disposición de los elementos sobre la maqueta fija y y de forma definitiva.

# BIBLIOGRAFIA.

[1] Shivangi Kamat, Sudhamshu M Hosamane, y Anshul Gandhi, «Designing an application-specific System-on-Chip (SoC)», 2016, doi: 10.13140/RG.2.2.27909.76006.

[2] V. S. Chakravarthi, «System on Chip (SOC) Design», en *A Practical Approach to VLSI System on Chip (SoC) Design: A Comprehensive Guide*, V. S. Chakravarthi, Ed. Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 11-40. doi: 10.1007/978-3-030-23049-4\_2.

[3] G. Tecnologías, «Sistemas Embebidos SoC - GENERA Tecnologías».

[4] S. Bhunia y M. Tehranipoor, «System on Chip (SoC) Design and Test», en *Hardware Security*, Elsevier, 2019, pp. 47-79. doi: 10.1016/B978-0-12-812477-2.00008-3.

[5] C. M. Maxfield, «Application-Specific Integrated Circuits (ASICs)», en *Bebop to the Boolean Boogie*, Elsevier, 2009, pp. 235-249. doi: 10.1016/B978-1-85617-507-4.00017-6.

[6] M. Maxfield, «EETimes - ASIC vs. ASSP vs. SoC vs. FPGA – What’s the Difference?», *EETimes*, 23 de junio de 2014. https://www.eetimes.com/asic-assp-soc-fpga-whats-the-difference

[7] E. Staff, «Fully-programmable SoCs - A new breed of devices», *Embedded.com*, 11 de noviembre de 2016.

[8] D. Oliveira, M. Costa, S. Pinto, y T. Gomes, «The Future of Low-End Motes in the Internet of Things: A Prospective Paper», *Electronics*, vol. 9, n.o 1, p. 111, ene. 2020, doi: 10.3390/electronics9010111.

[9] J. J. Rodriguez-Andina, M. D. Valdes-Pena, y M. J. Moure, «Advanced Features and Industrial Applications of FPGAs—A Review», *IEEE Trans. Ind. Inform.*, vol. 11, n.o 4, pp. 853-864, ago. 2015, doi: 10.1109/TII.2015.2431223.

[10] V. Jayakrishnan y C. Parikh, «Embedded Processors on FPGA: Soft vs Hard», 2019. https://www.semanticscholar.org/paper/Embedded-Processors-on-FPGA%3A-Soft-vs-Hard-Jayakrishnan-Parikh/5155eb3da21a8c1f1e8e246360194cc0556159cb

[11] K. Bouaziz, A. Obeid, y S. Chtourou, «A review on embedded field programmable gate array architectures and configuration tools», *Turk. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 28, p. 17, ene. 2020, doi: 10.3906/elk-1901-193.

[12] I. Kuon y J. Rose, «Measuring the Gap Between FPGAs and ASICs», *IEEE Trans. Comput.-Aided Des. Integr. Circuits Syst.*, vol. 26, n.o 2, pp. 203-215, feb. 2007, doi: 10.1109/TCAD.2006.884574.

[13] H. Saidi, M. Turki, Z. Marrakchi, M. Abid, y A. Obeid, «Soft-core embedded FPGA based system on chip», *Analog Integr. Circuits Signal Process.*, vol. 109, n.o 3, pp. 517-533, dic. 2021, doi: 10.1007/s10470-021-01872-5.

[14] J. Patel, Y. Shah, y L. He, «Bridge Design between AXI Lite and AHB Bus Protocol», *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1993, n.o 1, p. 012008, ago. 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1993/1/012008.

[15] L.-B. Chen, J.-C. Ju, C.-C. Wang, y I.-J. Huang, «HPChecker: An AMBA AHB On-Chip Bus Protocol Checker with Efficient Verification Mechanisms», *IEICE Trans. Inf. Syst.*, vol. E93-D, n.o 8, pp. 2100-2108, 2010, doi: 10.1587/transinf.E93.D.2100.

[16] A. Gupta, K. Rawat, S. Pandey, P. Kumar, S. Kumar, y H. P. Singh, «Physical design implementation of 32-bit AMBA ASB APB module with improved performance», en *2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT)*, Chennai, India, mar. 2016, pp. 3121-3124. doi: 10.1109/ICEEOT.2016.7755276.

[17] M. Mitic y M. Stojcev, «An overview of on-chip buses», *Facta Univ. - Ser. Electron. Energ.*, vol. 19, n.o 3, pp. 405-428, 2006, doi: 10.2298/FUEE0603405M.

[18] «Somaraju et al. - 2014 - DESIGN AND IMPLEMENTATION OF THE ADVANCED MICROCON.pdf».

[19] B. N. Manu y P. Prabhavathi, «Design and implementation of AMBA ASB APB bridge», en *2013 International Conference on Fuzzy Theory and Its Applications (iFUZZY)*, Taipei, Taiwan, dic. 2013, pp. 234-238. doi: 10.1109/iFuzzy.2013.6825442.

[20] «AXI Basics 1 - Introduction to AXI». https://support.xilinx.com/s/article/1053914?language=en\_US

[21] «Shrivastav et al. - 2011 - Performance Comparison of AMBA Bus-Based System-On.pdf».

[22] «AXI4-Lite Interface-Introduction to AXI4-Lite». https://www.realdigital.org/doc/a9fee931f7a172423e1ba73f66ca4081

[23] «AMBA AXI and ACE Protocol Specification Version E». https://developer.arm.com/documentation/ihi0022/e/AMBA-AXI4-Lite-Interface-Specification/AMBA-AXI4-Lite/Interoperability?lang=en