



BUAP

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA

“AUTOMATIZACIÓN DE LA PRODUCCION, INTERFERENCIA, Y ENREDAMIENTO DE LUZ CON MOMENTO ANGULAR ORBITAL PARA APLICACIONES EN COMUNICACIONES ÓPTICAS”*

Tesis presentada para obtener el título de:
**MAESTRIA EN CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA
OPCIÓN EN AUTOMATIZACIÓN**

Presenta:

ING. JESÚS LÓPEZ GÓMEZ**

Asesores de la Tesis:

Dra. Ma. Aurora D. Vargas Treviño, FCE-BUAP

Dr. Víctor Manuel Velázquez Aguilar, FC-UNAM



PUEBLA, PUE. MEXICO

ENERO 2016

***Trabajo financiado por el proyecto: PAPIIT-UNAM y VIEP-BUAP**

**** Becario CONACyT**

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar ante todas las cosas le doy gracias a Dios nuestro padre celestial que es el creador de todas las cosas “*porque Él da la sabiduría, y de su boca viene el conocimiento y la inteligencia*”.

Agradezco a mi familia por su valioso apoyo en todo momento, a mi esposa y a mis hijos que siempre me han acompañado y junto conmigo han disfrutado los buenos momentos y perseverando en los malos momentos durante la maestría, pero que fueron un motivo para poder concluir el grado con éxito. De la misma manera agradezco a mis padres que siempre estuvieron atentos sin dejarme de apoyar. A mis primos, B. Elizabeth López y su esposo Erik Gutiérrez y mis tíos José A. López y su esposa Blanca Castro, que sin duda alguna me brindaron su apoyo y su confianza durante el periodo de la maestría en la ciudad de Puebla.

A mis asesores, a la Dra. Aurora Vargas Treviño, el Dr. Víctor Velázquez Aguilar, y el Dr. Sergio Vergara Limon, que me apoyaron y me orientaron durante la maestría, le agradezco su paciencia y la confianza depositada en mí y sus aportes de conocimiento científico, sin duda alguna no dejaron de apoyarme en los momentos difíciles, gracias a cada uno de los asesores y que lo hago parte de este logro tan importante en mi vida que me ayudaron a dar el siguiente paso a un futuro prometedor.

A los miembros del jurado revisor, a la Dra. Darnes (Presidenta), el Dr. Salvador Alcántara (Secretario) y el Dr. Sergio Vergara Limon (Vocal), por sus consejos técnicos y correcciones de la tesis, gracias porque sus opiniones fueron importantes en cada avance de tesis y le dieron un valor a este esfuerzo, siendo posible lograr los objetivos de este proyecto.

A CONACyT por el financiamiento de la beca brindado en el periodo de la maestría.

DEDICATORIA

A mi esposa Marisela Santos Arias, a mis hijos Asaf Jesús López Santos y Adriel Eduardo López Santos que son la razón más importante de haber continuado los estudios de maestría y que decidieron dejar la comodidad por seguir mis sueños.

A mis padres, Jesús López Córdova y Martha Gómez Hernández, con su mayor esfuerzo y paciencia me han ayudado a superarme en la vida y en lo profesional, los honro grandemente por su humildad y que parte de su vida dedicaron con arduo trabajo suplir las necesidades que me ayudaron a salir adelante.

RESUMEN

Históricamente la automatización ha mejorado e incrementado considerablemente no solo en la producción industrial, sino también está presente en la realización de experimentos científicos como parte de la enseñanza, así como la investigación. El objetivo de este trabajo consiste en el estudio de la producción de fotones individuales con Momento Angular Orbital (MAO), la interferencia cuántica de fotones, su distribución espacial (enredamiento espacial).

El experimento con Momento Angular Orbital consta de un arreglo Optoelectrónico básicamente con los siguientes componentes: un láser de 405,38nm de 100mW con un ancho de banda de 0,78nm, un divisor de haz 50:50, rejilla tenedor con bifurcación $l=+1s$, fibras ópticas multimodal y fotodiodos de avalancha (APDs, *Avalanche Photodiode*) que generan pulsos convirtiéndose en una señal eléctrica cuadrada.

El experimento consiste en generar haces Leguerre-Gauss (LG) a través de hologramas (o rejillas de difracción) producidos por computadora. Cuando esta rejilla se ilumina con un haz de ondas planas se genera, a primer orden, el patrón de intensidad y fase que se requiere, en particular, para producir los modos LG se requiere una rejilla de tenedor.

El proyecto consiste en producir éste tipo de patrones de una manera automatizada y construir un sistema de detección con eficiencia cuántica para estudiar los conteos y realizar correlaciones espaciales de fotones con diferentes Momento Angular Orbital. Con un arreglo de cinco detectores, se obtienen cinco señales eléctricas obtenidas de la difracción con Momento Angular Orbital, obteniendo las distribuciones $l = -2, -1, 0, +1, +2$, que al procesarlos en una tarjeta de coincidencias podríamos analizar las correlaciones de fotones de dichas distribuciones.

Por otra parte, el estudio de estos fotones con Momento Angular Orbital implica tratar de entender como una partícula y no una onda puede propagarse con una cierta helicidad, también es posible realizar experimentos de interferencia de luz con Momento Angular Orbital, al superponer dos rejillas la luz que cruza este arreglo superpuesto, tendrá un patrón de interferencia, en este caso, es muy importante poder manipular una fibra óptica con desplazamiento micrométrico en dos dimensiones de forma que podamos estudiar las correlaciones espaciales de fotones que realizan la interferencia.

Dada la necesidad del experimento, se propone el diseño y fabricación de tres posicionadores cartesianos de alta precisión con eficiencia cuántica, y el desarrollo e implementación del sistema de adquisición de datos por comunicación WiFi, el cual consiste de hardware, firmware y software de aplicación. Con lo anterior, podríamos estudiar los conteos y realizar correlaciones espaciales de fotones con diferentes Momento Angular Orbital con detección de desplazamiento lineal micrométrico.

ÍNDICE GENERAL

Introducción.....	8
Objetivos.....	12
Capítulo 1.- Fundamentos teóricos.....	13
1.1 Introducción.....	13
1.2 Momento del campo electromagnético.....	13
1.2.1 Vector de Poynting y conservación de la energía.....	13
1.3 Momento Angular Orbital.....	14
1.3.1 Luz con Momento Angular Orbital.....	14
1.3.2 Modos Leguerre-Gauss.....	16
1.3.3 Momento Angular Orbital del modo de Leguerre-Gauss.....	20
1.4 Producción de luz con Momento Angular Orbital.....	21
1.5 Conclusiones.....	22
Capítulo 2.- Montaje del experimento.....	23
2.1 Introducción.....	23
2.2 Producción de luz con Momento Angular Orbital.....	23
2.3 Interferencia Cuántica de luz con Momento Angular Orbital.....	25
2.4 Enredamiento de luz con Momento Angular Orbital.....	25
2.5 Conteo y Correlación espacial de luz con Momento Angular Orbital.....	26
2.5.1 Montaje del Arreglo Optoelectrónico.....	26
2.5.2 Descripción del experimento: Régimen clásico.....	26
2.5.3 Análisis y resultados previos experimentales.....	28
2.6 Características del experimento.....	36
2.6.1 Rejilla de difracción.....	36
2.6.2 Divisor de Haz.....	37
2.6.3 Fotodiodo de Avalanche Photodiodes, (APDs).....	37
2.6.4 Tecnología SPCM.....	39
2.6.5 Detector SPCM-AQ4C.....	39
2.7 Propuesta para la solución del problema.....	42
2.7.1 Arreglo Optoelectrónico con divisor de haz para el conteo y correlación.....	42
2.7.2 Configuración de la detección.....	44
2.7.3 Robots cartesianos de tres grados de libertad.....	45

2.8 Conclusiones.....	45
Capítulo 3.- Diseño y construcción de posicionadores tipo cartesianos.....	46
3.1 Introducción.....	46
3.2 Características del robot.....	46
3.2.1 Especificaciones de diseño.....	47
3.2.2 Configuración del espacio de trabajo.....	47
3.3 Modelo cinemático y dinámico del robot	48
3.3.1 Método de Euler-LaGrange	48
3.4 Diseño y construcción mecánico del robot	50
3.4.1 Tornillo embalado.....	51
3.4.2 Riel de precisión tipo HSR.....	52
3.4.3 Sistema de transmisión.....	53
3.5 Fabricación de piezas.....	56
3.5.1 Estructura mecánica.....	56
3.5.2 Chumaceras.....	57
3.5.3 Tuerca de husillo de apoyo.....	57
3.5.4 Soporte tipo C.....	58
3.6 Resultados de diseño.....	58
3.7 Conclusiones.....	59
Capítulo 4.- Hardware del sistema.....	60
4.2 Control del sistema.....	60
4.2 Motor reductor 37DX57Lmm.....	61
4.3 Etapa de potencia.....	61
4.2.2 BTS7960B Driver.....	62
4.3.2 Buffer 74HC244D.....	67
4.3.3 Diagrama general del puente H.....	69
4.4 Caracterización del motorreductor.....	70
4.4.1 Torque.....	70
4.4.2 Equipo para la caracterización.....	71
4.4.2.1 Torquimetro.....	72
4.4.2.2 Montaje de caracterización.....	72
4.4.3 Metodología de caracterización.....	73
4.4.3.1 Motor 1.....	73

4.4.3.2	Motor 2.....	76
4.4.3.3	Motor 3.....	78
4.5	Encoder incremental.....	81
4.5.1	Encoder del motor.....	81
4.5.2	Resolución teórica.....	85
4.6	Interfaz WiFi.....	86
4.6.1	Modulo RN-XV.....	86
4.6.2	Protocolo 802.11g.....	88
4.6.3	UART.....	89
4.1	Diseño de la tarjeta de control.....	90
4.7.1	Características de la tarjeta.....	91
4.7.2	Tarjeta hija FPGA (Field Programmable Gate Array).....	91
4.7.3	Diseño de la tarjeta.....	92
4.8	Conclusiones.....	93
Capítulo 5.- Firmware del sistema.....		94
5.1	Diseño del Firmware.....	94
5.1.1	Filtro digital.....	94
5.1.2	Decodificador del Encoder.....	95
5.5.3	Convertidores de BITS de datos.....	95
5.1.4	Receptor y transmisión de datos UART.....	96
5.1.5	Selector de motores.....	99
5.1.6	Controlador tangente hiperbólico.....	100
5.1.7	Bloque PWM.....	101
5.2	Conclusiones.....	108
Capítulo 6.- Software del sistema.....		109
6.1	Diseño del Software.....	109
6.1	Conexión Interfaz de usuario Labview.....	110
6.2	Programación Labview de las posiciones.....	111
6.4	Programación Labview de las Ganancias.....	112
6.5	TCP/IP.....	113
6.5.1	TCP Open/Abrir TCP.....	113
6.2.1	TCP Write/Escribir en TCP.....	113
6.5.3	TCP Close/Cerrar TCP.....	114

6.6 Escritura.....	114
6.7 Envío de comandos.....	115
6.8 Conclusiones.....	115
Capítulo 7.- Resultados del experimento Óptico.....	116
7.1 Pruebas y resultados del sistema posicionador.....	116
7.2 Resultados del experimento Óptico.....	118
7.2.1 Prueba simple para el conteo de Fotones.....	120
7.3 Conclusiones.....	124
Conclusiones generales.....	125
Referencias bibliográficas.....	128
Publicación de resultados.....	129

INTRODUCCIÓN

La manipulación de fotones y átomos individuales representa un avance tecnológico con muchas promesas de aplicaciones en comunicaciones e información. La base de ésta tecnología es el aprovechamiento de la información codificada en las componentes cuánticas de éstos entes individuales. Así fenómenos como interferencia cuántica y enredamiento cuántico son conceptos que no tienen una contraparte clásica, por ello, es muy importante comprenderlos y manipularlos para su mejor aprovechamiento.

Laboratorios de prestigio internacional, están automatizando constantemente sus experimentos, ya que esto acelera el aprendizaje y la generación del conocimiento. Por ello, es importante desarrollar tecnología que permita la automatización de procesos y experimentos científicos.

En el Laboratorio de Óptica Avanzada de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México (FC-UNAM), se realizan diversos experimentos educativos y de investigación; entre ellos, se ha estudiado ampliamente el enredamiento en polarización de pares de fotones, sin embargo, llevar éste tipo de enredamiento a estados multipartitas depende de la tecnología de producción de estados de Fock con más de dos fotones, crucial para la multiplexión requerida en el despliegue de información. Recientemente el estudio del Momento Angular Orbital en la luz ha conducido directamente a su contraparte en luz no clásica que representa una opción de multiplicidad de estados cuánticos.

La generación de fotones con momento angular orbital representa una técnica en la que se puede producir el enredamiento multipartita de componentes cuánticas. Por lo que en el estudio del experimento, consiste en la producción de fotones individuales con Momento Angular Orbital, su distribución espacial (enredamiento espacial) y su automatización.

Por otra parte se aborda el estudio de la interferencia cuántica de fotones, para ello, se propone una técnica estudiada por el grupo de Óptica cuántica de la Facultad de Ciencias a la interferencia de luz clásica con Momento Angular Orbital y se ponen a prueba a nivel cuántico. Este método, nos proporcionará información acerca de la pureza y longitud de coherencia de fotones. En esa misma dirección se estudia la aplicación de una nueva técnica difractiva para el estudio del contenido de Momento Angular Orbital recientemente propuesta.

Finalmente, se estudiarán dos técnicas de enredamiento de fotones, el primero es el enredamiento codificado directamente en los fotones en el momento de su producción, éste es el método más estudiado ya que el único límite en el orden de enredamiento es la dimensión de los estados de número de fotones (estados de Fock) alcanzados.

La otra técnica, denominada enredamiento post-seleccionado, y ha sido estudiada únicamente en polarización, pero no en Momento Angular Orbital. En éste el dispositivo de enredamiento es posterior al mecanismo de producción de los estados Fock los pares (tríos, cuartetos, etc.) de fotones son enviados al dispositivo que produce Momento Angular Orbital. El elemento que mezcla las componentes cuánticas después de la producción de los estados Fock es un divisor de haz no polarizante. El divisor de haz sólo posee dos opciones de direccionalidad (transmitido y reflejado). En cambio, en la producción de fotones, la direccionalidad depende directamente de la carga de Momento Angular Orbital, estudiaremos este grado de libertad y su influencia en el enredamiento.

Por esta razón, es importante encontrar soluciones a todo esto y obtener resultados en menor tiempo y con un mínimo de error humano, el cual nos permita automatizar el experimento. En el mercado existen algunos dispositivos o instrumentos relacionados con la automatización de experimentos de correlación de pares de fotones. Algunos dispositivos están dedicados al movimiento lineal, a la detección y conteo de fotones individuales, tales como:

- *Lineal Stage UPS-150*: Fue diseñado específicamente para alineamiento de fibras ópticas, consta de un rango de viaje hasta 305mm con resolución calculada de $1.5\mu\text{m}$ bidireccional, consumo de corriente de 1.4A, con máxima velocidad desde una $1.5\mu\text{m}/\text{seg}$ hasta 600mm/seg, [1].
- *Ultra precisión Lineal Stage UPM-160*: Fue diseñado específicamente para inspección de obleas, alineamiento de fibras ópticas y otras aplicaciones donde se requiere alta precisión, consta de un rango de viaje hasta 205mm con resolución calculada de $1\mu\text{m}$ bidireccional, consumo de corriente de 2.5A, con máxima velocidad desde una $1\mu\text{m}/\text{seg}$ hasta 100mm/seg, [2].
- *SPCM-AQR Series*: Módulo contador de fotones individuales (SPCM, *Single Photon Counting Module*), capaz de detectar fotones individuales de un haz de luz con una longitud de onda de 400 a 600nm. Este módulo utiliza un fotodiodo de avalancha (APD, *Avalanche Photodiode*) con una eficiencia de detección de 70% sobre un área de $180\mu\text{m}$ en 650nm. Puede contar a una tasa de 10 millones de cuentas/segundo. Aplicaciones: Correlación Espectroscópica de Fotones, Observación Astronómica, Fluorescencia ultra Sensitiva, LIDAR¹ entre otros [3].

- *SPCM-AQRH*: Similar a los anteriores. Rango de operación para un haz con una longitud de onda de 400-1060nm. Eficiencia hasta 80% en 700nm. Área activa de 180 μ m. Con aplicaciones similares a SPCM-AQR Series [4].
- τ -*SPAD*: Es un SPCM para un haz de luz con una longitud de onda de 400 - 1000nm; Utiliza un APD; eficiencia de 75% en 670nm; área activa 150nm; salida TTL. Aplicaciones: Espectroscopia de Moléculas Individuales (SMS, *Single Molecule Spectroscopy*), Espectroscopia de Correlación Fluorescente (FCS, *Fluorescence Correlation Spectroscopy*), LIDAR, Caracterización de Fuentes de Fotón, entre otros [5].
- *TimeHarp 200*: Es una tarjeta PCI (*Peripheral Component Interconnect*) para el conteo de fotones individuales correlacionados espacialmente; tasa de conteo de hasta 3 millones de cuentas/s; Capacidad de ruteo para 4 canales, entre otras características. Algunas aplicaciones: Espectroscopia Luminescente y Fluorescente de resolución temporal, FCS y SMS. Caracterización de respuesta temporal de dispositivos optoelectrónicos, y correlación de coincidencias y anti-agrupamiento [6].

Altera Corporation, provee una tarjeta de desarrollo educativa, el cual es el modelo DE2. Con esta tarjeta, se puede implementar un sistema de coincidencias, que fueron publicadas por Mark Beck en [7]. La tarjeta de desarrollo DE2 incluye: una tarjeta de 8x6" con un FPGA Cyclone II EPC2C35, un adaptador de 9V, un cable USB, protección con plexiglás y una guía de instalación. En el artículo [7], Mark Beck publicó el procedimiento para programar la tarjeta, así como una descripción breve de las posibles combinaciones de entradas. Asimismo, publicó el tiempo de resolución, el cual es del orden de 8ns.

En el año de 2005 el Dr. Sergio Vergara y la Dra. Aurora Vargas, de la FCE-BUAP, diseñó y construyeron una tarjeta de adquisición de datos. Dicha tarjeta PCI, fue la primera versión de un contador de fotones individuales y sus coincidencias, utilizada en la FC-UNAM. Dicha tarjeta emplea un FPGA MAX7000AETC144-5 y tiene una resolución de 5-30ns, [8].

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

Se sabe que Laboratorios como el Instituto Tecnológico de Massachusetts, EUA, el Laboratorio Nacional Fermi en EUA, CERN, Suiza, etc. han tenido grandes logros debido a que tienen automatizados gran parte de sus experimentos, por ello es de una importancia estratégica desarrollar tecnología que permita la automatización de procesos y experimentos científicos, con esto los estudiantes e investigadores obtendrán resultados en un menor tiempo y con un mínimo de error humano. En el laboratorio de óptica cuántica de la Facultad de Ciencias de la UNAM se realizan diversos experimentos educativos y de investigación, estos experimentos son complejos y toman varias semanas o hasta meses en tomarse los datos y posteriormente hacer su análisis.

Los experimentos consisten básicamente en el estudio de las correlaciones de las propiedades de fotones, a saber: frecuencia, polarización, momento, posición de detección, momento angular orbital. Para este tipo de experimentos, es fundamental tener una fuente de fotones individuales. Los estados de fotones individuales nos garantizan que en cada estado sólo existe uno y sólo un paquete de energía indivisible. Con este tipo de fotones es posible realizar experimentos de mecánica cuántica, relacionados con las nuevas tecnologías como ya se mencionó arriba. Tales tecnologías implican el uso de fenómenos cuánticos, como el de enredamiento cuántico. El enredamiento puede utilizarse, para el uso del encriptamiento cuántico de información; cómputo cuántico; microlitografía cuántica; entre otras aplicaciones.

En el caso de la tarjeta de adquisición de datos, diseñada previamente en la FCE-BUAP, se pretende mejorar: la capacidad de conteo, el procesamiento de datos y la resolución. Además es necesario hacer cambios al software para incluir el procesamiento de la información obtenida por el proceso de conteo y correlaciones de fotones con MAO. Para el caso del experimento de momento angular orbital se obtienen valores de coincidencia adicionales, que requieren ser procesados para no hacer dichos cálculos manualmente. Por ello se plantea automatizar este experimento. El sistema será usado para impartir cátedra y realizar investigaciones relacionadas a la naturaleza del experimento.

El presente trabajo de tesis plantea la Automatización del experimento de la producción de fotones individuales con momento angular orbital (MAO), interferencia cuántica de fotones con MAO y su distribución espacial (enredamiento espacial) de fotones con MAO, el cual se lleva a cabo en el Laboratorio de Óptica Avanzada de la FC-UNAM; el interés de este trabajo se centra en la Automatización del experimento de MAO; para ello, se pretende abarcar el diseño y construcción de tres robots cartesianos de alta precisión y controlar los robots, implementar el **hardware**, desarrollar el **firmware** y **software**; realizar las pruebas respectivas del experimento y documentar los resultados.

OBJETIVOS

Objetivo general:

Automatizar las mediciones de la producción, interferencia y enredamiento de fotones con momento angular orbital y desarrollar el **firmware**, **hardware** y **software** del sistema.

Objetivos particulares:

- Estudiar los conceptos básicos de la producción, interferencia y enredamiento de fotones con momento angular orbital.
- Estudiar la tarjeta receptora de coincidencias y las características apropiadas para adquirir las señales producidas en el experimento desarrollado en la Facultad de Electrónica de la BUAP.
- Estudiar la cinemática y el modelo dinámico para un posicionador cartesiano de 3GDL.
- Diseñar e implementar tres posicionadores cartesianos.
- Diseñar e instrumentar un sistema de adquisición de datos con las características apropiadas para procesar las señales adquiridas de los posicionadores.
- Desarrollar el firmware de la tarjeta de adquisición.
- Desarrollar el software para automatizar la adquisición y procesamiento de los datos generados por los posicionadores.
- Realizar pruebas experimentales.
- Escritura de la Tesis.
- Publicación de los resultados.

CAPITULO 1.

FUNDAMENTOS TEORICOS

1.1 Introducción

En este capítulo se describe el experimento de la generación de fotones con momento angular orbital (MAO). La óptica cuántica es un tema que salió a la luz durante el último cuarto del siglo XX. Se ocupa de los fenómenos ópticos que pueden ser explicados solamente, tratando a la luz como un flujo de fotones en lugar de ondas electromagnéticas.

En la teoría de la luz existen tres enfoques llamados, teoría: clásica, semi-clásica y cuántica. En la física clásica, la luz es tratada como ondas electromagnéticas; en la óptica cuántica, como fotones [9]. En la teoría clásica es conocido las ecuaciones de maxwell, momento electromagnético, modos Leguerre-gauss, vector de Poynting, que muestra a la el comportamiento de la luz como ondas; en el caso de la óptica cuántica, en el caso con fuentes de fotones cuánticos con MAO implica tratar de entender como una partícula y no una onda puede propagarse con una cierta helícida., el cual es muy similar pero esta trata con fotones.

El conjunto de ecuaciones de Maxwell junto con las relaciones constitutivas y condiciones de frontera correspondientes, así como también la ley de fuerzas sobre partículas cargadas y la segunda ley de Newton, constituyen los cimientos sobre los cuales se construye la teoría denominada Electrodinámica clásica, cuyo objetivo es la descripción de la dinámica de sistemas en los que se involucran campos electromagnéticos y cargas en movimiento. Para llegar a comprender la óptica cuántica de fotones, primero mencionaremos la teoría clásica para la luz como una onda. Es posible demostrar, a partir de estas ecuaciones, que la radiación electromagnética porta energía, momento y momento angular. Estos hechos se discutirán en el presente capítulo.

1.2 Momento del campo electromagnético

1.2.1 Vector de Poynting y conservación de la energía

Si se consideran las ecuaciones de Maxwell con fuentes en medios arbitrarios:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{Ec. 1.1})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (\text{Ec. 1.2})$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{Ec. 1.3})$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{Ec. 1.4})$$

Donde ρ es las densidades de carga y \mathbf{J} la corriente libre, se puede verificar la conservación de la carga de manera que:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{\mathbf{J}} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0. \quad (\text{Ec. 1.5})$$

Esta expresión se conoce como ecuación de continuidad e indica que el cambio en la cantidad de carga almacenada en una región del espacio, se debe a una corriente a través de la frontera de esta región. Las ecuaciones de Maxwell también permiten obtener una expresión para la densidad de energía del campo electromagnética (Ec. 1.6).

$$u = \frac{1}{2}(\vec{\mathbf{E}} \cdot \vec{\mathbf{D}} + \vec{\mathbf{H}} \cdot \vec{\mathbf{B}}) \quad (\text{Ec. 1.6})$$

Que conduce a la ecuación de continuidad para la conservación de la energía involucrada en un proceso electromagnético:

$$\frac{\partial}{\partial t} u + \vec{\mathbf{J}} \cdot \vec{\mathbf{E}} + \vec{\nabla} \cdot (\vec{\mathbf{E}} \times \vec{\mathbf{H}}) = 0. \quad (\text{Ec. 1.7})$$

Esta expresión establece que el cambio en la energía almacenada en una región del espacio se debe al flujo de energía ($\vec{\mathbf{E}} \times \vec{\mathbf{H}}$) a través de la frontera y al cambio en el trabajo:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \vec{\mathbf{J}} \cdot \vec{\mathbf{E}} \quad (\text{Ec. 1.8})$$

Realizado sobre un conjunto de cargas que pudieran estar presentes en la región de interés. La corriente de energía:

$$\vec{\mathbf{S}} = \vec{\mathbf{E}} \times \vec{\mathbf{H}} \quad (\text{Ec. 1.9})$$

Se conoce como vector de Poynting y es un vector cuyo modulo representa flujo de energía electromagnético por unidad de área y cuya dirección es la de propagación de la onda electromagnética. En el SI las unidades del vector de Poynting son en ($\text{watts}=\text{m}^2$).

1.3 Momento Angular Orbital

1.3.1 Luz con Momento Angular Orbital

En la sección anterior se mostró que se puede asociar un momento angular orbital al campo electromagnético. La cuestión es cómo interpretar esta variable dinámica en la radiación. Intuitivamente se puede pensar a la luz con momento angular orbital igual a cero como un frente de ondas ordenado cuyos puntos de fase constante forman planos perpendiculares a la dirección de propagación \mathbf{k} . La amplitud del campo eléctrico de una onda plana en un instante dado se puede escribir como:

$$E(\mathbf{r}) = E_0 e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}} + c.c., \quad (\text{Ec. 1.10})$$

Donde \mathbf{k} es el vector de onda y los puntos \mathbf{r} de fase constante satisfacen la condición:

$$\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} = \text{constante} \quad (\text{Ec. 1.11})$$

Que es la ecuación de un plano ortogonal a \mathbf{k} . La distribución transversal de intensidades de la onda plana es Gaussiana ver Figura 1.1. Contrariamente, en la luz con momento angular orbital, algunas secciones del frente de ondas se retrasan o se adelantan con respecto de otras y los puntos de fase constante forman otro tipo de superficie, ver Figura 1.2.

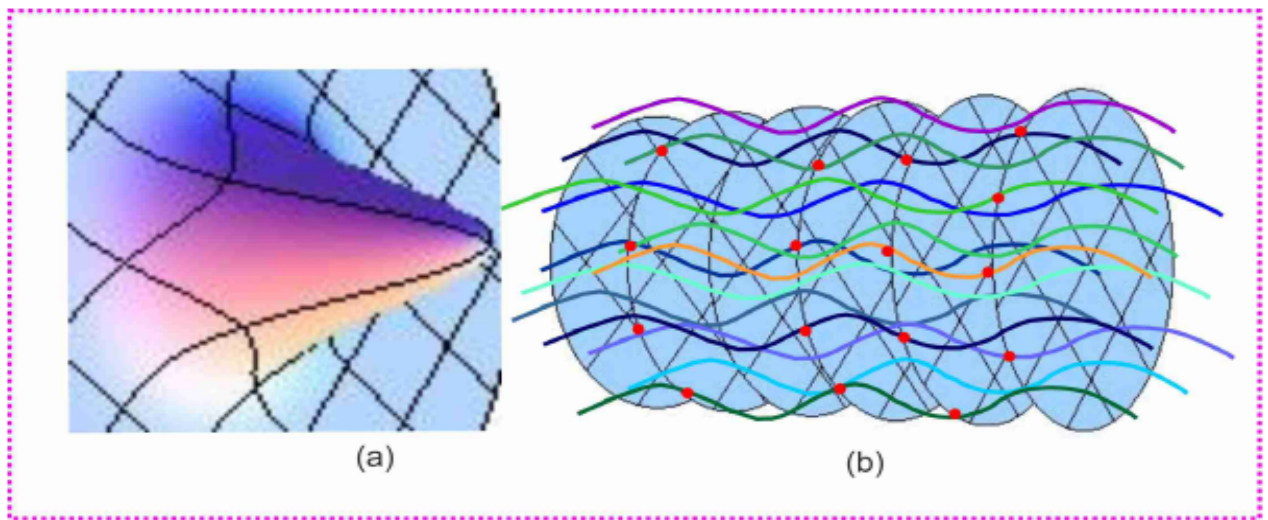


Figura 1.1. En la sección transversal del frente de ondas plano se observa una distribución de intensidades Gaussiana (a). El frente de ondas de un haz de luz con momento angular orbital igual a cero, donde los puntos de fase constante forman planos (b).

La luz en una distribución Gaussiana puede adquirir momento angular orbital mediante diversas técnicas. La sección transversal del frente de ondas en estos casos puede presentar distintas distribuciones de intensidad por ejemplo: Laguerre-Gauss (LG), Hermite-Gauss (HG), Bessel, entre otras [10]. En las siguientes secciones se formalizará el concepto de momento angular de la radiación que se discutió aquí de manera intuitiva.

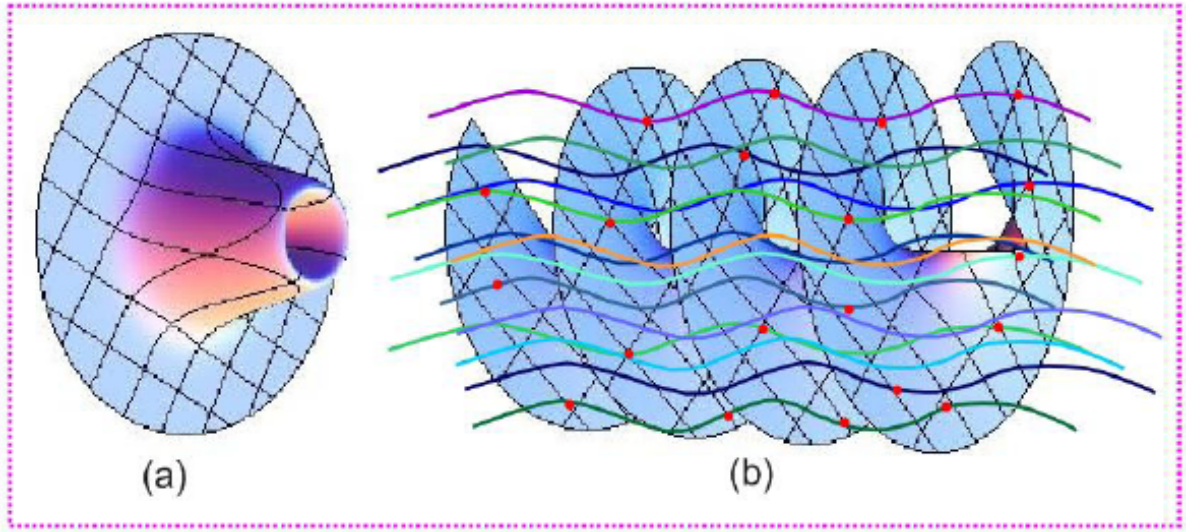


Figura 1.2 (a) En el caso que se presenta en esta Figura, la luz posee momento angular $l = 1$ que es la unidad de momento angular orbital, y la distribución transversal de intensidades es un modo de Laguerre-Gauss. (b) Algunas secciones del frente de ondas se retrasan con respecto de otras y los puntos de fase constante forman otro tipo de superficie.

1.3.2 Modos Laguerre-Gauss

La ecuación de onda para el campo eléctrico de una onda electromagnética libre (en el vacío y sin fuentes) está dada por:

$$\vec{\nabla}^2 \vec{E}(\mathbf{r}, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}(\mathbf{r}, t)}{\partial t^2} = 0. \quad (\text{Ec. 1.12})$$

La ecuación de Maxwell $\nabla \times \vec{B} = 0$ implica que el campo de inducción magnética siempre se puede expresar en términos de un potencial vectorial $\vec{A}(\mathbf{r}, t)$ en la forma:

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A}. \quad (\text{Ec. 1.13})$$

De esta manera el campo eléctrico toma la forma:

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t}. \quad (\text{Ec. 1.14})$$

La libertad de norma nos permite elegir \vec{A} de tal forma que $\nabla \times \vec{A} = 0$ (norma de Coulomb), que es apropiada cuando se consideran ondas transversales. Así es posible demostrar que el potencial \vec{A} satisface la ecuación de onda:

$$\vec{\nabla}^2 \vec{A} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} = 0. \quad (\text{Ec. 1.15})$$

Si se considera al potencial vectorial $\vec{A}(\mathbf{r}, t)$ como la integral de Fourier:

$$\vec{A}(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \vec{A}(\mathbf{r}, w) e^{-iwt} dw, \quad (\text{Ec. 1.16})$$

Cada componente de Fourier $A(\mathbf{r}; w)$, satisface la ecuación de Helmholtz:

$$\nabla^2 \vec{A}(\mathbf{r}, w) + k^2 \vec{A}(\mathbf{r}, w) = 0. \quad (\text{Ec. 1.17})$$

Supongamos que la onda electromagnética está linealmente polarizada, es decir, que $A(\mathbf{r}) = A(r)\hat{\epsilon}$ con $\hat{\epsilon}$ un vector unitario constante. Supongamos además que el campo es casi-armónico en la dirección del eje óptico, que sin pérdida de generalidad se elige como el eje z , es decir:

$$A(\mathbf{r}, w) = U(x, y, z) e^{-ikz} \quad (\text{Ec. 1.18})$$

Con $U(x; y; z)$ una función que varía muy lentamente en z . En la región paraxial, es decir, en regiones muy cercanas al eje óptico, las variaciones en las direcciones transversales al eje z son mucho mayores a las variaciones en esa dirección, despreciamos entonces la derivada segunda de U en z , y tenemos:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} U(\mathbf{r}) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} U(\mathbf{r}) - 2ik \frac{\partial}{\partial z} U(\mathbf{r}) = 0, \quad (\text{Ec. 1.19})$$

Que se conoce como Ecuación Paraxial de Helmholtz. La solución a esta ecuación en coordenadas cilíndricas está dada por [11].

$$U(\mathbf{r}) = LG(\mathbf{r}) = K \frac{1}{q_0} \left(\frac{z - q_0}{z + q_0} \right)^{n + \frac{1}{2}} \left(\frac{ir^2 k}{\chi^2} \right)^{\frac{1}{2}} \mathbf{L}_n^{(l)} \left(\frac{ir^2 k}{\chi^2} \right) e^{il\theta} e^{-\frac{ikr^2}{2q}} \quad (\text{Ec. 1.20})$$

Dónde:

$$q = z + q_0,$$

$$X^{-2} = \frac{1}{z - q_0} - \frac{1}{z + q_0},$$

$q_0 \in \mathbb{C}$ es una constante que tiene que ver con el ancho del haz de luz,

$$n \in \mathbb{Z}^+$$

$\mathbf{L}_n^{(l)}$: Un polinomio asociado Leguerre,

K : Una constante de normalización que se determina exigiendo que:

$$\frac{\epsilon_0}{2} \int_{\mathbb{R}^3} |\mathbf{E}(\mathbf{r})|^2 d\tau = \hbar\omega. \quad (\text{Ec. 1.21})$$

Esta condición indica que la onda electromagnética transporta una energía finita. Observe que la expresión:

$$\frac{\epsilon_0}{2} \int_{\mathbb{R}^3} |\mathbf{E}(\mathbf{r})|^2 d\tau \quad (\text{Ec. 1.22})$$

Es la energía del campo eléctrico, de manera que se puede igualar a una constante con unidades de energía. De esta forma la expresión (Ec. 1.21) nos está indicando que se está usando un sistema de unidades en el que la energía se mide en unidades de $\hbar\omega$.

Se puede observar de la ecuación (Ec. 1.20) que la variación angular de U es periódica mientras que la dependencia en r y z es un producto de Gaussiana y polinomio asociado de Laguerre $L_n^1(x)$. A continuación se presentan algunas graficas de la intensidad de esta solución para diferentes valores de n y l . La Figura 1.3, muestra la distribución de intensidades de modos de LG con $l = 1$ y distintos valores de n , se puede observar que conforme n crece la distribución de intensidades es más abierta y angosta.

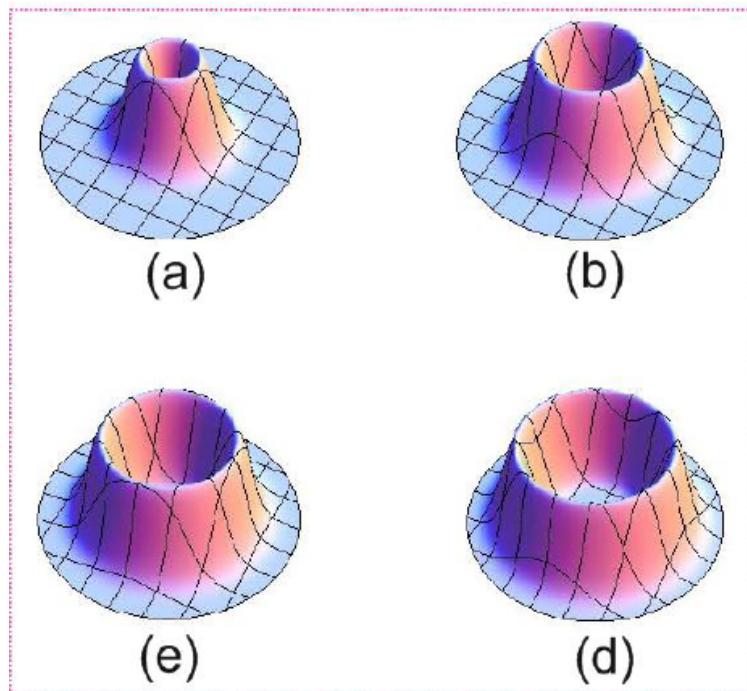


Figura 1.3. Distribución de intensidades de los modos de Laguerre-Gauss con $l=1$ y diferente n : (a) $n=0$, (b) $n=1$, (e) $n=2$, (d) $n=3$.

La Figura 1.4, presenta una superposición de modos de LG para (a) $l = 0, n = 0; 1; 2; 3$ y (b) $l = 1, n = 0; 1; 2; 3$. En estas distribuciones es clara la estructura interna debido a la presencia de varios modos de distinta n .

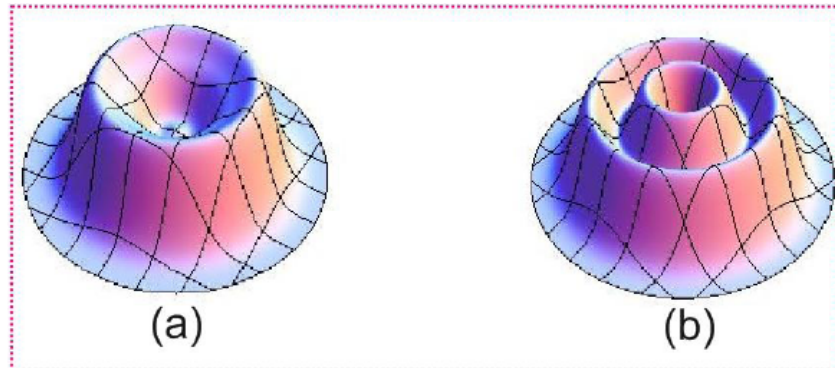


Figura 1.4. Superposición de 4 haces Laguerre-Gauss con $l=0$ y diferente $n=0, 1, 2,3$ (a). (b) $l=1, n=0,1,2,3$.

En la Figura 1.5 se puede observar las superficies del frente de ondas con (a) $l = 1$ y (b) $l = -1$, note el giro inverso que distingue entre el valor del positiva y negativa. Similarmente para (e) $l = 2$ y (d) $l = -2$. En estas dos últimas figuras además se observa que entre mayor sea el valor de l el frente de ondas del modo de LG contiene un número mayor de hélices.

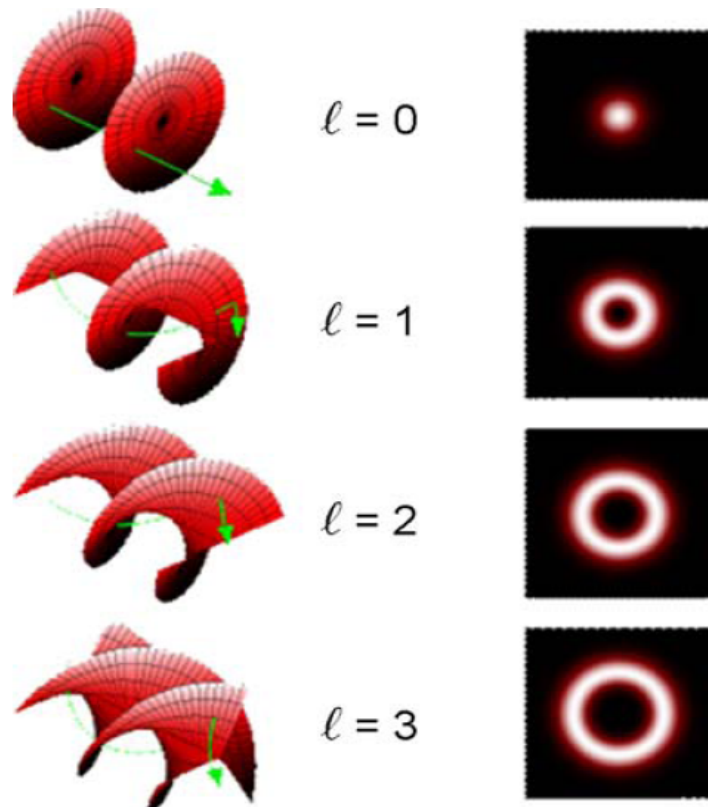


Figura 1.5 Frentes de fase helicoidales estructura de fase, y perfiles de intensidad correspondientes de los modos Laguerre-Gauss. Ver sección en color.

1.3.3 Momento Angular Orbital del modo Leguerre Gauss

Ya se ha mostrado que el campo electromagnético posee momento angular orbital. En esta sección se mostrará que los modos de LG portan momento angular orbital bien definido. Con este fin se sustituye la expresión para estos modos en las relaciones (Ec. 1.13) y (Ec. 1.14):

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = iwU(x, y, z)e^{-ikz}\hat{e}, \quad \mathbf{B}(\mathbf{r}) = \nabla(U(x, y, z)e^{-ikz}) \times \hat{e}. \quad (\text{Ec. 1.23})$$

La densidad de movimiento lineal del campo electromagnético está dada por:

$$\mathbf{p} = \frac{\epsilon_0}{2}(\mathbf{E}^* \times \mathbf{B} + \mathbf{E} \times \mathbf{B}^*), \quad (\text{Ec. 1.24})$$

De manera que la densidad de momento angular es:

$$\mathbf{l} = \frac{\epsilon_0}{2}\mathbf{r} \times (\mathbf{E}^* \times \mathbf{B} + \mathbf{E} \times \mathbf{B}^*). \quad (\text{Ec. 1.25})$$

Cuando se sustituye en esta expresión los campos eléctrico y magnético de (Ec. 1.23), para la luz polarizada linealmente, y se integra sobre todo el espacio se obtiene el momento angular orbital del modo de LG.

$$\mathbf{L} = \epsilon_0 w l \pi \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty |LG(\mathbf{r})|^2 r dz dr \hat{z}. \quad (\text{Ec. 1.26})$$

Recordando sin embargo la condición (Ec. 1.22), es claro que:

$$\frac{\epsilon_0 w}{2\hbar} \int_{\mathbb{R}^3} |LG(\mathbf{r})|^2 d\tau = 1. \quad (\text{Ec. 1.27})$$

Ya que la dependencia angular es sólo una fase, se concluye que $|LG(\mathbf{r})|^2$ no depende del ángulo θ así que:

$$\frac{\epsilon_0 w \pi}{\hbar} \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty |LG|^2 d\tau = 1, \quad (\text{Ec. 1.28})$$

Y de esta forma obtenemos:

$$\int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty |LG|^2 d\tau = \frac{\hbar}{\epsilon_0 w \pi}. \quad (\text{Ec. 1.29})$$

Sustituyendo esta expresión en (Ec. 1.26) encontramos finalmente que en concordancia con:

$$\mathbf{L} = \epsilon_0 \omega l \pi \frac{\hbar \hat{z}}{\epsilon_0 \omega \pi} = l \hbar \hat{z}. \quad (\text{Ec. 1.30})$$

Es importante recalcar que, a pesar de que los valores del momento angular se discretizan y se miden en unidades de \hbar , no significa que el momento angular del campo electromagnético esté cuantizado pues éste sigue siendo un sistema clásico.

1.4 Producción de luz con Momento Angular Orbital

Ahora, surge la siguiente pregunta ¿Cómo producir en la práctica luz con momento angular orbital? Existen distintas técnicas, por ejemplo, se puede usar un conjunto de lentes cilíndricas que transforman haces de HG sin momento angular en modos de LG con momento angular bien definido. Este conjunto de lentes puede en principio producir un rango muy amplio de este tipo de modos. Si se incrementa la separación entre las lentes se puede manipular además la helicidad del frente de ondas [12]. Otro método para cambiar la helicidad es un prisma de Dove ver Figura 1.6. Esta técnica sin embargo tiene la limitante de que se requiere en principio producir los modos de HG ver [13]. En [14,15] se generan por computadora hologramas o rejillas, básicamente superponiendo un haz Gaussiano y uno de LG. En observan entrelazamiento cuántico usando haces de LG, pero ellos generan los haces de LG con un modulador espacial de luz.

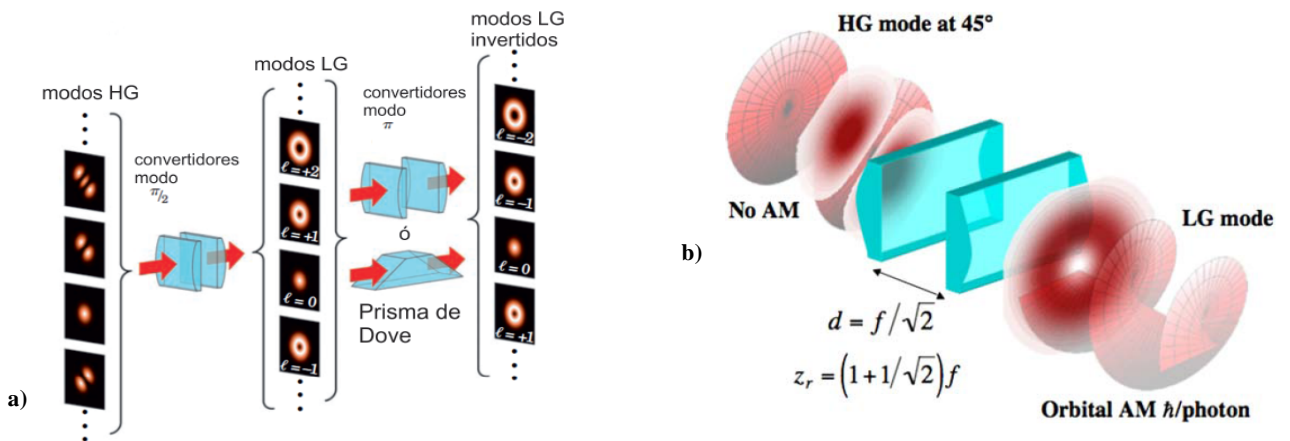


Figura 1.6. a) Se muestra un método para generar modos de LG a partir de un modo de HG mediante lentes cilíndricas y para cambiar la helicidad con un prisma de Dove. **b)** Convertidor de modo lente cilíndrica utilizada para transformar los modos de Hermite-gaussianos en modos de Laguerre-gaussianos.

La técnica más común para generar haces de LG es a través de hologramas (orejillas de difracción) producidos por computadora. Así, prácticamente se puede generar un haz con cualquier valor de momento angular orbital. La rejilla de difracción adecuada se puede producir a partir del patrón de interferencia entre un haz de luz Gaussiano (frente de ondas planas) y un haz de luz con la distribución deseada [16].

Cuando esta rejilla se ilumina con un haz de ondas planas se genera, a primer orden, el patrón de intensidad y fase que se requiere. En particular, para producir los modos de LG se requiere una rejilla de tenedor, como la que se muestra en la Figura 1.7 y que se genera mediante la expresión [17, 18].

$$l \frac{\theta}{\pi} = \gamma + \frac{2r}{\Lambda} \cos \theta, \quad (\text{Ec. 1.31})$$

Donde $(r;\theta)$ son las coordenadas polares, l es el número de dislocaciones en la rejilla de tenedor, n es un número entero y Λ es el periodo de la rejilla a grandes distancias de la región de dislocación. Distintos valores de los parámetros en esta expresión generará distintas rejillas que producirán diferentes modos de luz con momento angular bien definido. En este trabajo se produjeron los haces de LG con este tipo de rejillas.

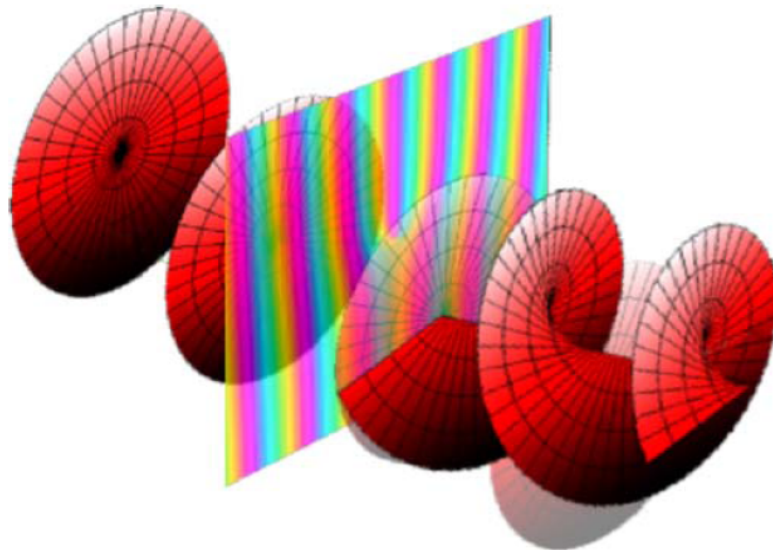


Figura 1.7. Rejilla de difracción de tenedor para producir luz con momento angular.

1.5 CONCLUSIONES

Para este capítulo de la tesis se cumple el objetivo de comprender teóricamente el fenómeno cuántico que presenta este experimento, se estudió la forma clásica del experimento, es decir, con un láser clásico que emite ondas planas y es refractado por una rejilla de difracción tipo tenedor que presenta Momento Angular Orbital. Cada sección de este capítulo se explica de manera general las partes por las que pasa y va presentando el fenómeno clásico.

CAPITULO 2

MONTAJE DEL EXPERIMENTO

2.1 Introducción

El experimento consiste en el estudio de la producción de fotones individuales con Momento Angular Orbital (MAO), para ello proponemos una técnica estudiada por el grupo de Óptica Cuántica de la Facultad de Ciencias Aplicada a la difracción de luz clásica con Momento Angular Orbital y que pondremos a prueba a nivel cuántico, y finalmente estudiaremos las técnicas de enredamiento de fotones con (MAO). A continuación explicaremos con detalle como producir Momento Angular Orbital para estudiar los conteos y correlaciones espaciales de fotones con diferente Momento Angular.

2.2 Producción de luz con Momento Angular Orbital

Existen diferentes técnicas para codificar Momento Angular Orbital en luz. La que utilizaremos aquí, es a través de un medio difractado. Este medio es una rejilla con una discontinuidad espacial que produce un cambio angular en la distribución de la intensidad de la luz. Ésta discontinuidad tiene la forma de un tenedor en la rejilla. Con éste método un frente de onda gaussiano (de un láser) es difractado en los diferentes órdenes de Momento Angular Orbital. El máximo central no posee Momento Angular ($l=0$), el primer orden difractado posee Momento Angular $l=+1,-1$, y así, sucesivamente. Intuitivamente, la discontinuidad representada por la bifurcación del tenedor es suficiente para producir un cambio angular en la distribución de la intensidad de luz. Esto quiere decir, que si dejamos únicamente ésta bifurcación de luz con Momento Angular Orbital en la que la magnitud del Momento Angular tendría que ver con el orden de la bifurcación presente (carga topológica) en el tenedor. Así, un Momento Angular Orbital l dependerá del número de dientes que posea el tenedor. En la figura 2.1 se muestra una bifurcación de tenedor con carga topológica uno, sólo una bifurcación. Para producir más de un orden, se utiliza el rayado de la rejilla. La rejilla por ella misma produciría un patrón de haces gaussianos cada uno con un orden difractado del haz gaussiano original.

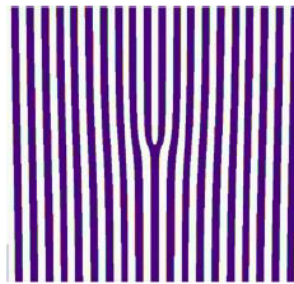


Figura 2.1. Rejilla de tenedor (o rejilla de difracción) con bifurcación +1s.

En la figura 2.2, se muestra el esquema de producción de haces adifraccionales con Momento Angular Orbital utilizando una rejilla de difracción tipo tenedor. Al igual que en la difracción de la luz (o refracción) la luz cuya frecuencia es mayor será dispersada a un ángulo mayor. Así, la luz con Momento Angular mayor será dispersada a ángulos mayores.

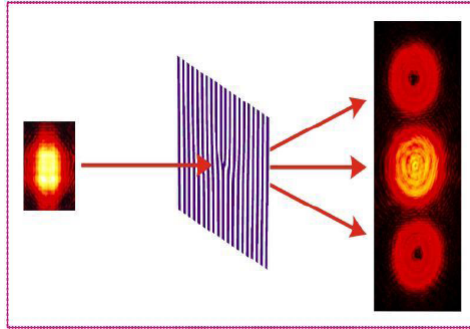


Figura 2.2. Esquema de producción de haces adifraccionales con (MAO).

Cuando obtenemos la Transformada de Fourier de la rejilla de difracción obtenemos el patrón de dispersión en diversos órdenes de magnitud de (MAO). Es decir, este tipo de rejilla funciona holográficamente, pues si consideramos que cuando el haz gaussiano llega a la rejilla, cada punto de la rejilla funciona como un oscilador que remite de manera puntual una nueva onda. Todas las ondas se sumarán de manera diferente en cada punto del campo de observación. Ya que en cada punto de este campo se tendrá una contribución de cada punto de la rejilla de difracción, la transformada de Fourier convierte cada intervalo de puntos de difracción en un intervalo de frecuencias que se distribuyen en todos los puntos de observación. El efecto total de esta transformación son los diferentes órdenes de Momento Angular Orbital. En la figura 2.3 se explica este efecto. La figura 2.3.1(a) muestra una rejilla de difracción con una bifurcación de tenedor. En la figura 2.3.1 (b) y(c) se muestra la transformada de Fourier de la rejilla en dos y tres dimensiones respectivamente. En la figura 2.3.2(a), (b) y(c) se muestran análisis experimentales sobre la producción de Momento Angular de éste tipo de rejillas. Utilizando un láser de 10mW y 633nm podemos observar diferentes órdenes de Momento Angular Orbital [figura 2.3.2(a)]. En la figura 2.3.2 (b) y(c) se muestran algunos detalles. Posteriormente, con estos resultados serán estudiados los conteos de fotones con los diferente Momento Angular y con un arreglo de cinco detectores analizaremos las correlaciones de fotones de las distribuciones $l=-2,-2, 0, 1,2$.

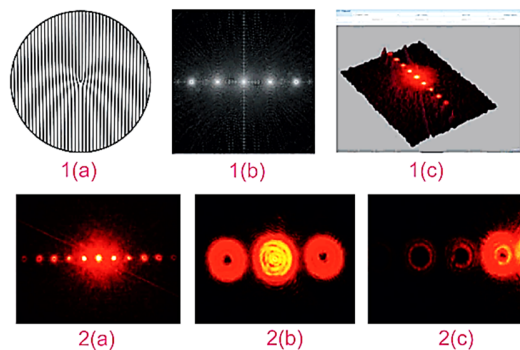


Figura 2.3. Diferentes órdenes de difracción de (MAO) producidos por una rejilla.

2.3 Interferencia cuántica de luz con MAO

Abordaremos el estudio de la interferencia cuántica con momento angular orbital, para ello proponemos una técnica estudiada por el grupo de óptica cuántica de la Facultad de Ciencias, aplicada a la interferencia de luz clásica con MAO y que pondremos a prueba a nivel cuántico. Este método nos proporcionará información acerca de la pureza y longitud de coherencia de fotones con MAO. Si ahora superponemos dos rejillas como las mostradas en la figura 2.4, la luz que cruza este arreglo superpuesto, tendrán un patrón de interferencia como el mostrado en la figura 2.5. En este caso es muy importante poder manipular una fibra óptica con desplazamiento micrométrico en dos dimensiones de forma que podamos estudiar las correlaciones espaciales de fotones que realizan la interferencia.

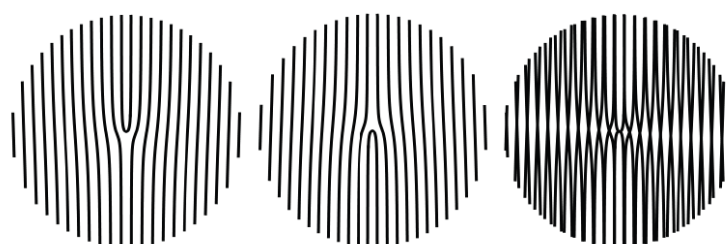


Figura 2.4. Superposición de dos rejillas de difracción.

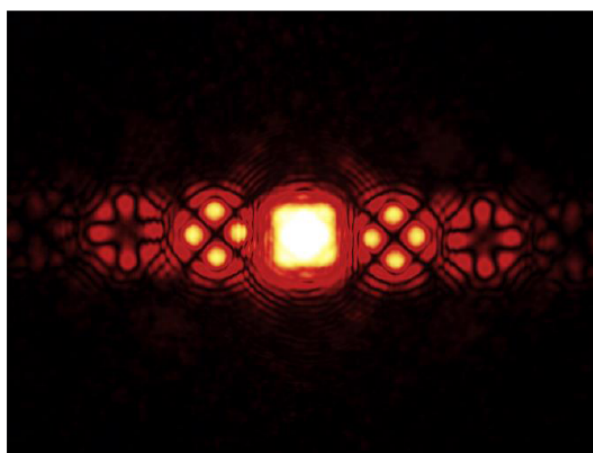


Figura 2.5. Patrón de interferencia de la superposición de las rejillas.

2.4 Enredamiento de luz con MAO

Estudiaremos dos técnicas de enredamiento. El enredamiento codificado directamente en los fotones en el momento de su producción, este es el método más estudiado, ya que el único límite en el orden de enredamiento es la dimensión de los estados de Fock. En este los pares (tríos, cuartetos, etc.) de fotones son enviados al dispositivo que produce el MAO. Esta misma técnica se ha utilizado en enredamiento en polarización post-seleccionado. El elemento que mezcla las componentes cuánticas después de la producción de los estados de Fock es un divisor de haz no polarizante. Sin embargo, el divisor de haz sólo posee dos opciones de direccionalidad (transmitido y reflejado). En cambio, en la producción de fotones con MAO, la

direccionalidad depende directamente de la carga de momento angular orbital. Estudiaremos este grado de libertad y su influencia en el resultado, para distintos valores de distribuciones l .

2.5 Conteo y Correlación espacial de luz con Momento Angular Orbital

Orbital

El proyecto consiste en producir fotones individuales con MAO, su distribución espacial (enredamiento espacial) de una manera automatizada y construir un sistema de detección con eficiencia cuántica para estudiar los conteos y correlación de fotones con diferencia momento angular. Las señales se obtienen del arreglo Optoelectrónico cuántico con MAO del experimento, el cual, del sistema de detección son enviadas al sistema electrónico para su procesamiento y análisis, el arreglo Optoelectrónico se muestra a continuación.

2.5.1 Montaje del Arreglo Optoelectrónico

Para obtener los resultados del experimento con Momento Angular Orbital, se ha definido el montaje general del arreglo Optoelectrónico experimental (Figura 2.6). A partir de éste se realiza la calibración de los instrumentos, así como el conteo de fotones de las distribuciones Leguerre-Gauss

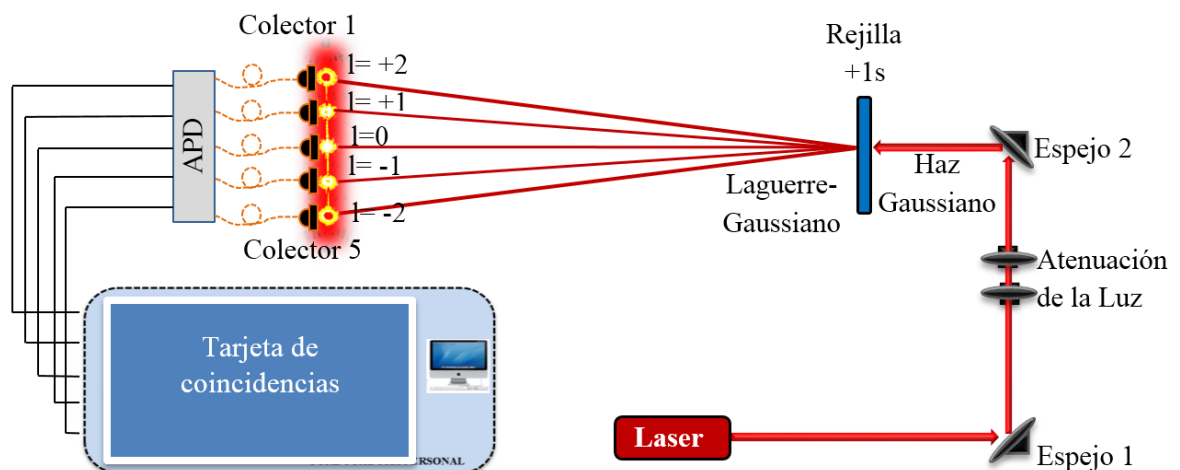


Figura 2.6. Arreglo Optoelectrónico cuántico con MAO.

2.5.2 Descripción del experimento: Régimen clásico

El experimento consiste en generar haces Leguerre-Gauss (LG) a través de una rejilla de difracción. En la figura 2.6, muestra el arreglo experimental de manera general y se observa un patrón de interferencia (anillos de difracción) con dislocaciones $l = -2, -1, 0, +1, +2$ obtenidas por la rejilla de tenedor +1s. Con un arreglo de cinco detectores conectadas a las fibras ópticas, y reciben los fotones que se dirigen al fotodiodo de avalancha (APDs) para convertirlas en una señal eléctrica. Al procesarlos podríamos estudiar el conteo de fotones y observar si existe correlación en dos distribuciones simétricas del primer modo de un mismo patrón, es decir, si las distribuciones espaciales de intensidades de ambos modos están correlacionadas de tal forma

que una de ellas nos dará información de la otra. Se hace un escaneo en los tres modos de mayor intensidad para hacer la calibración y alineación de los instrumentos. Cuando el detector arroja la distribución de modos Leguerre-Gauss, el sistema está alineado (Figura 2.7). De modo que se analizan el número de cuentas y coincidencias entre los anillos.

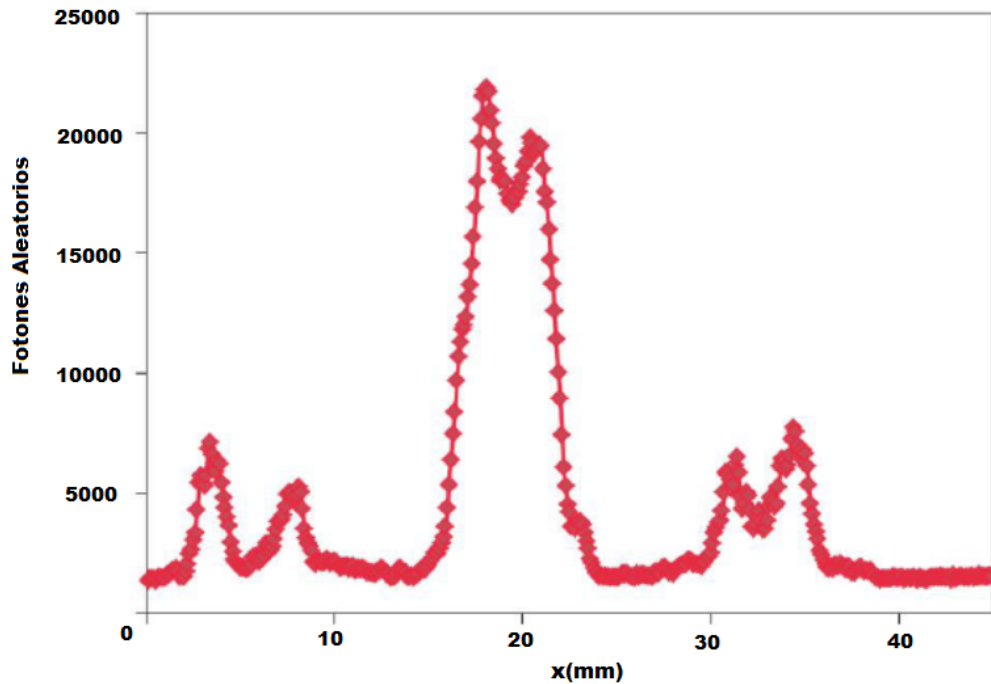


Figura 2.7 Distribución de Laguerre Gauss obtenida con una fuente clásica.

Primero alineamos perfectamente el láser con el colector que se encuentra colocado en el posicionador de la distribución LG2 y LG1 para que la luz pase completamente por la fibra óptica. De esta manera, posicionamos el primer detector a lo largo del diámetro vertical en la dislocación $l = +1$, fijamos 15 puntos de la distribución LG2 (Figura 2.8) con una distancia entre estos puntos de $80\mu m$. De modo que, el detector mide la intensidad en cada posición fija de la distribución LG2. Un segundo detector se posiciona a lo largo del diámetro vertical de la dislocación $l = -1$ haciendo un escaneo de la intensidad de la distribución LG1 a una velocidad de $500\mu m/seg$, obteniendo distintas graficas por cada punto de la LG2 con el mismo escaneo del LG1.

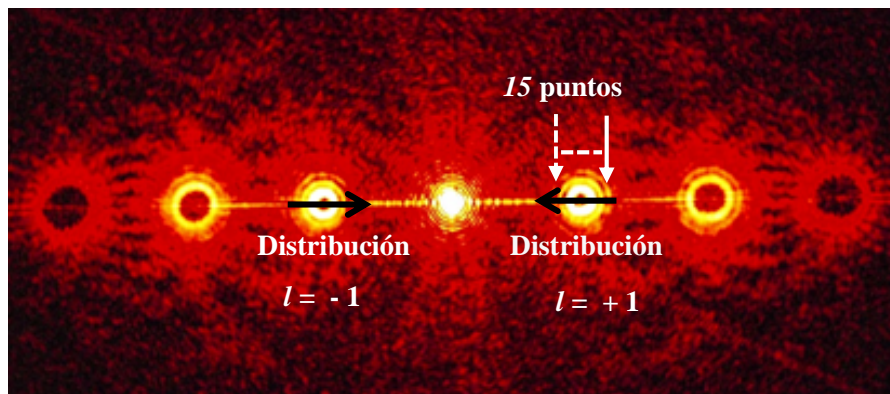
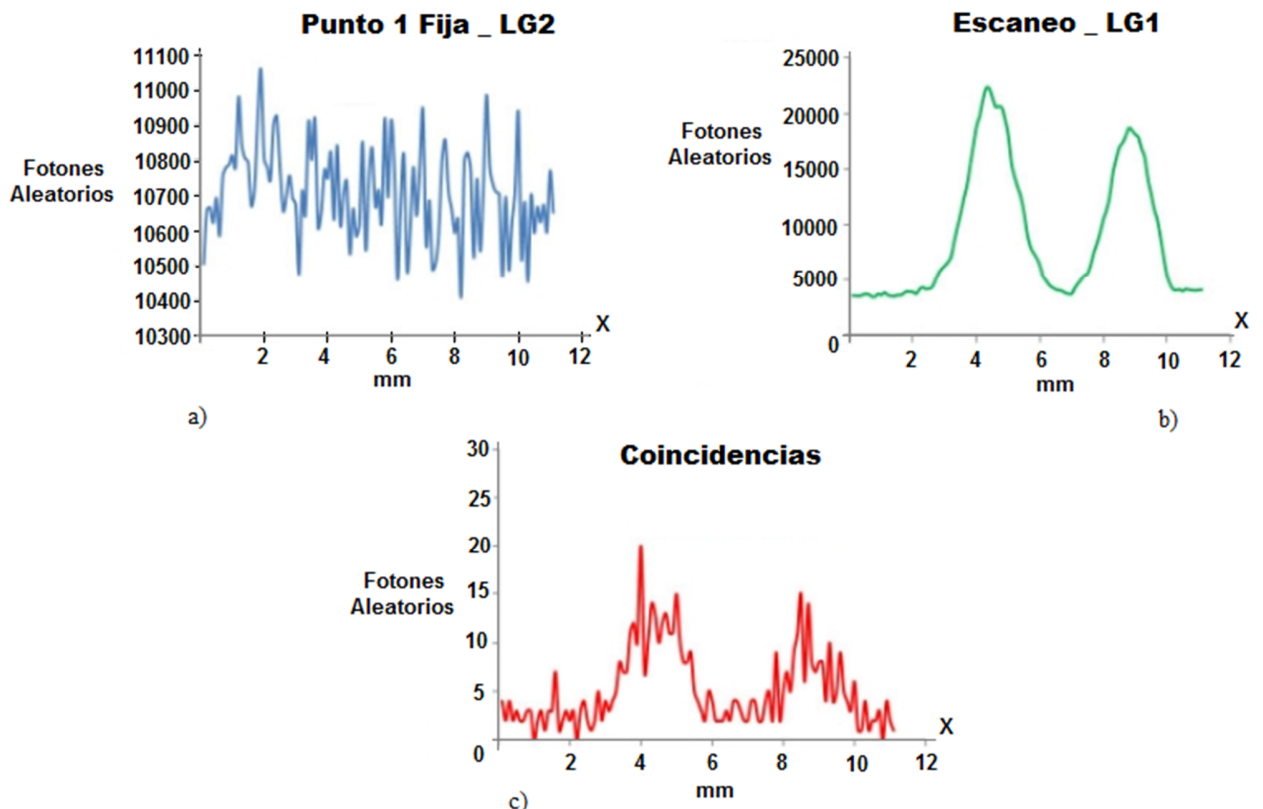
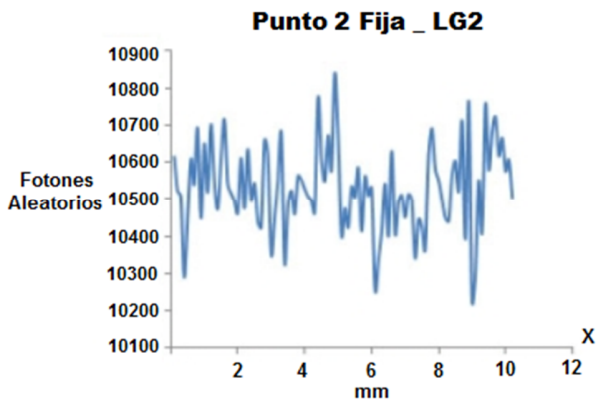


Figura 2.8. Arreglo del experimento tomando como base el estudio las dislocaciones $l = -1, +1(LG1, LG2)$, para obtener el conteo y coincidencias de fotones.

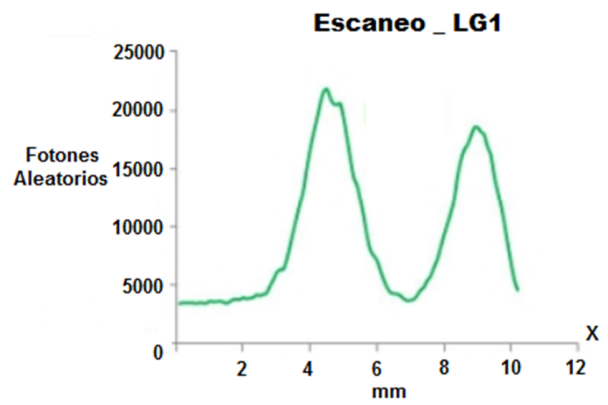
2.5.3 Análisis y resultados previos experimentales

Las siguientes graficas muestran los resultados del experimento régimen clásico, se realizó la calibración de manera no automatizada, se obtuvieron resultados previos y se puede ver distintas graficas de coincidencias (Figura 2.9). Una vez automatizada el experimento, el objetivo será obtener estos mismos resultados de manera más precisa junto con otras gráficas para encontrar las coincidencias de las distribuciones en menor tiempo y trabajo. Las gráficas están ordenas desde punto 1 al punto 15 de la distribución LG2, en la Figura 2.9 se muestra tres graficas en cada punto, en cada caso el **inciso a)** muestra los datos a menor escala e indica los conteos correspondientes al detector fijo de la distribución LG2 para las distintas posiciones del segundo detector y se observa que el frente de ondas no es plano, por lo tanto, los conteos fluctúan. El **inciso b)** muestra el escaneo de la distribución LG1, y se puede observar en la gráfica como asciende el número de conteos al máximo, luego descienden al centro y vuelve aumentar al máximo, ya que, el patrón de interferencia es un anillo con intensidad mínimo (casi cero) en el centro de la distribución, siendo hueca como en forma de una dona. Estas curvas se mantienen invariante y se pueden considerar como referencia del modo LG, de esta forma damos por hecho que las mediciones son correctas. Por último, en el **inciso c)** miden las intensidades de ambos detectores simultáneamente, y contienen los conteos en coincidencias, de esta manera, nos permitirán concluir si las distribuciones están o no correlacionadas. A continuación se muestran todas las gráficas:

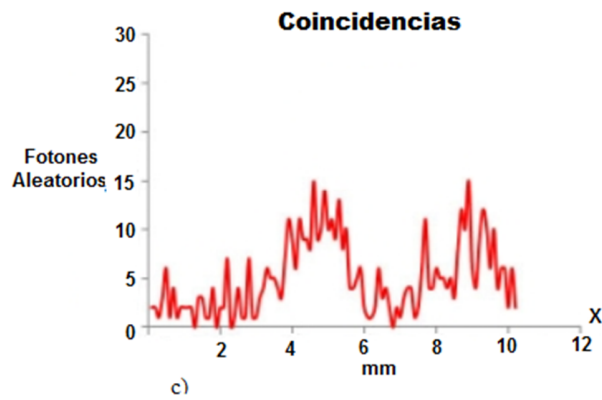




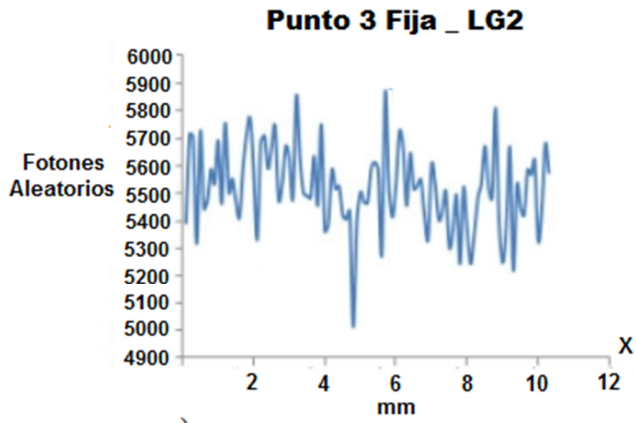
a)



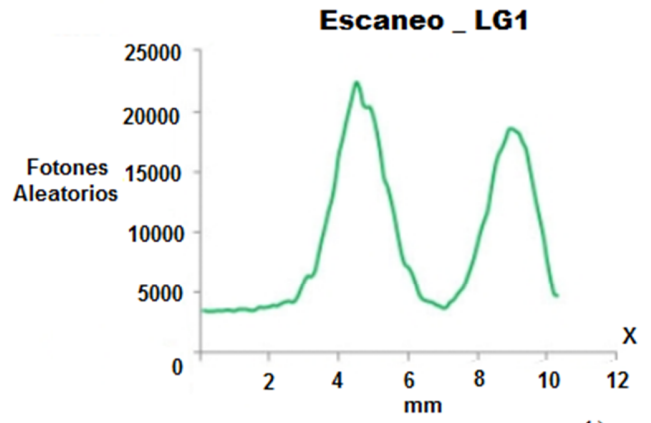
b)



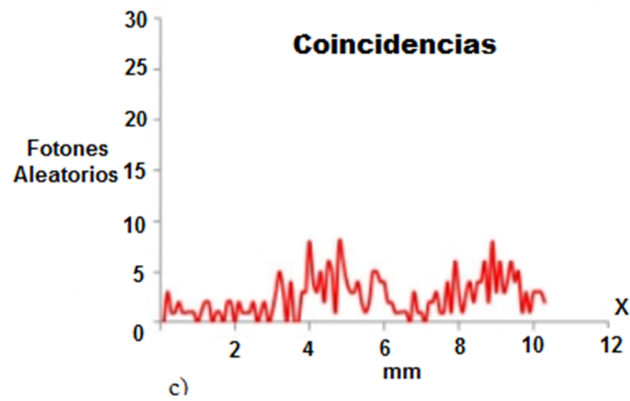
c)



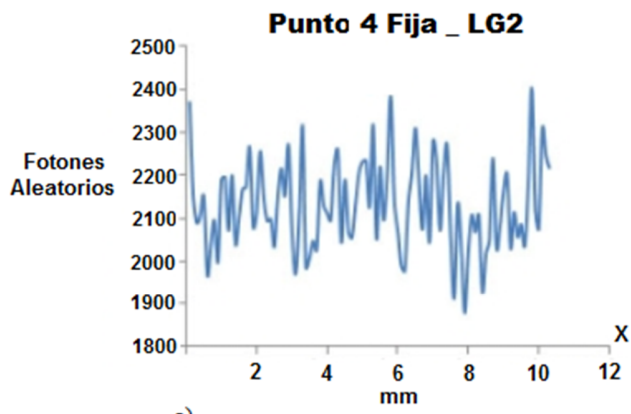
a)



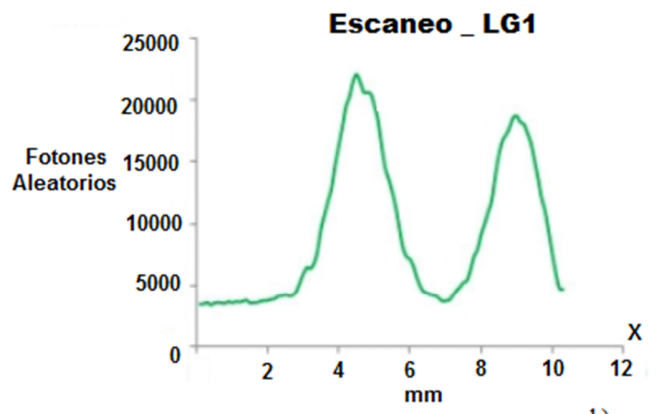
b)



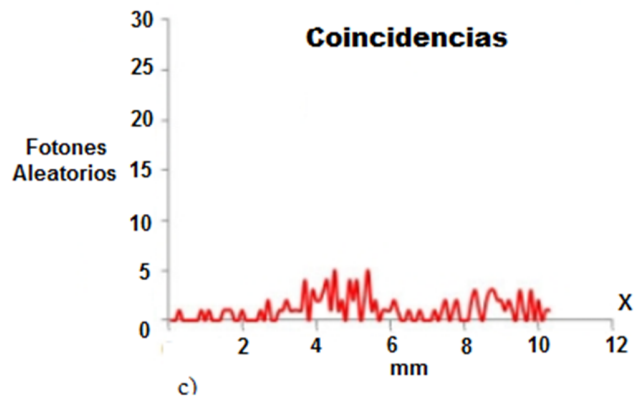
c)



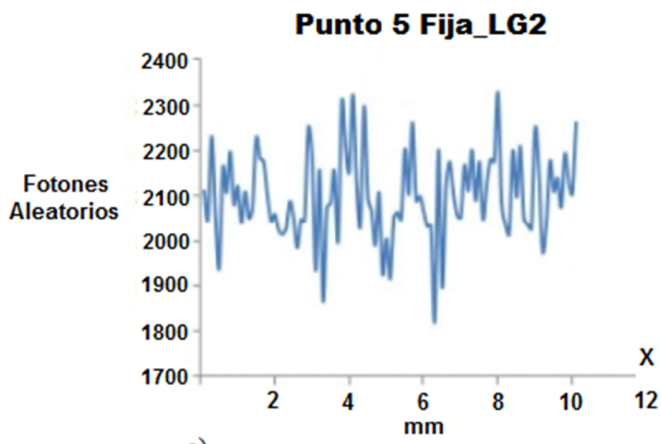
a)



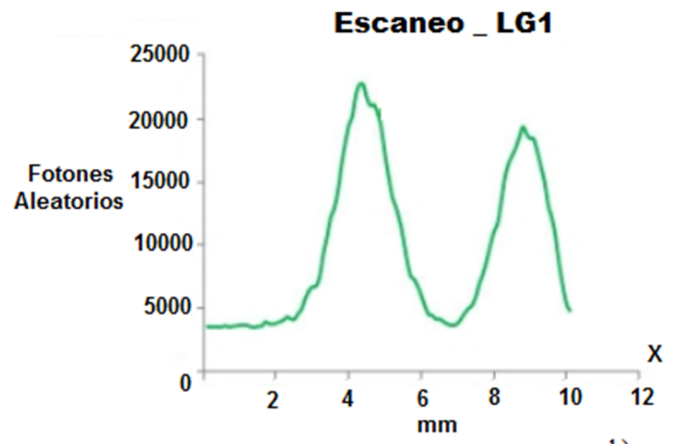
b)



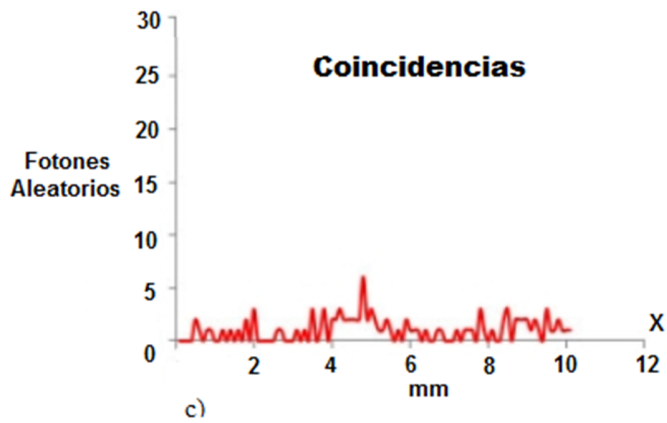
c)



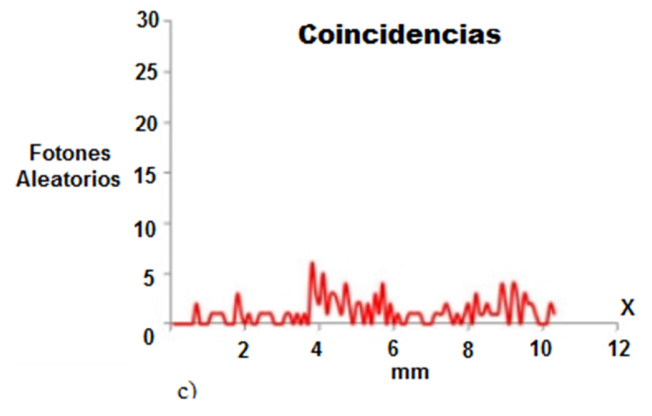
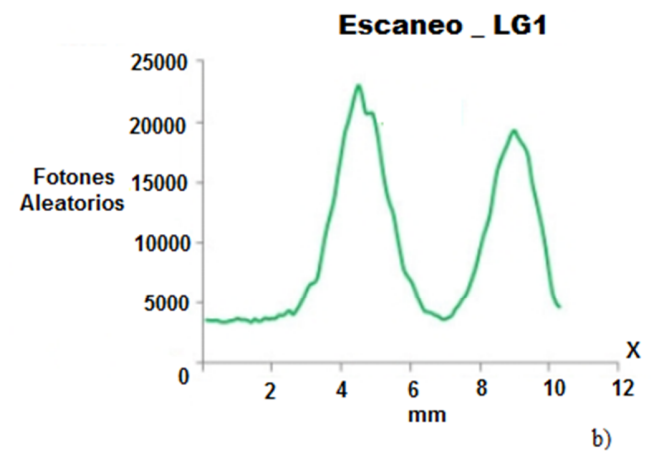
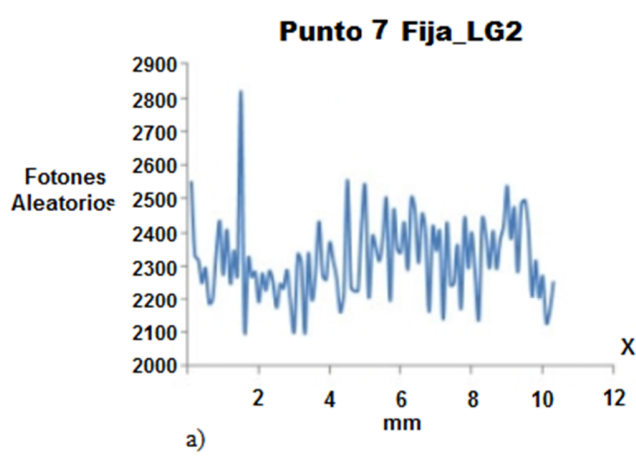
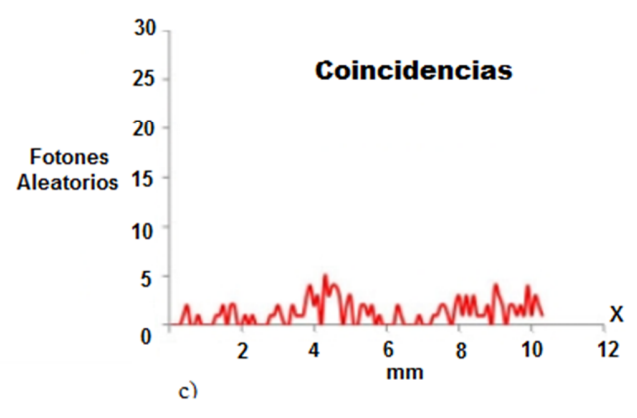
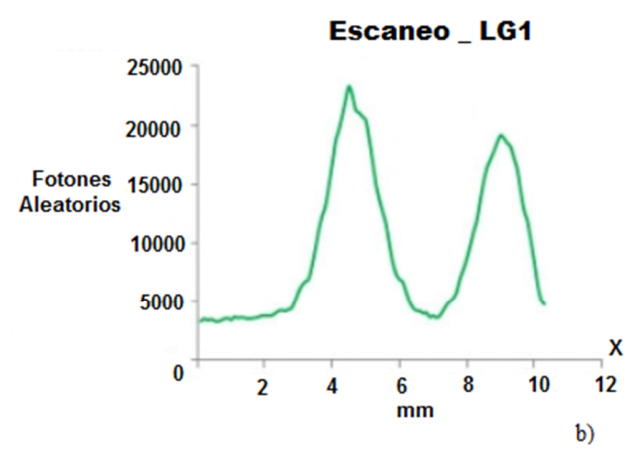
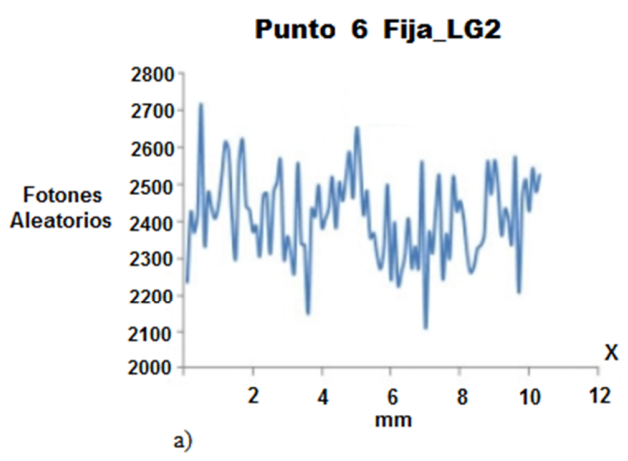
a)

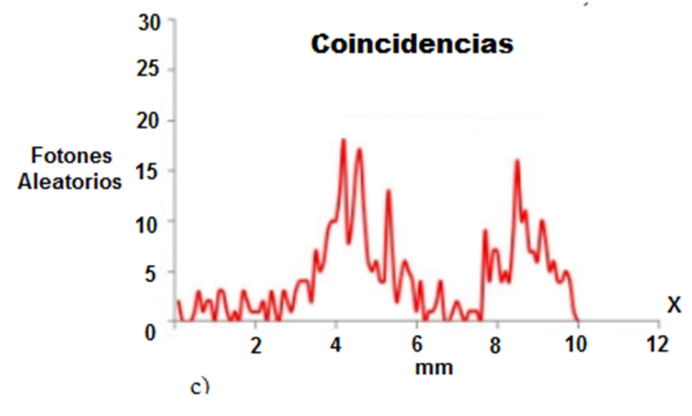
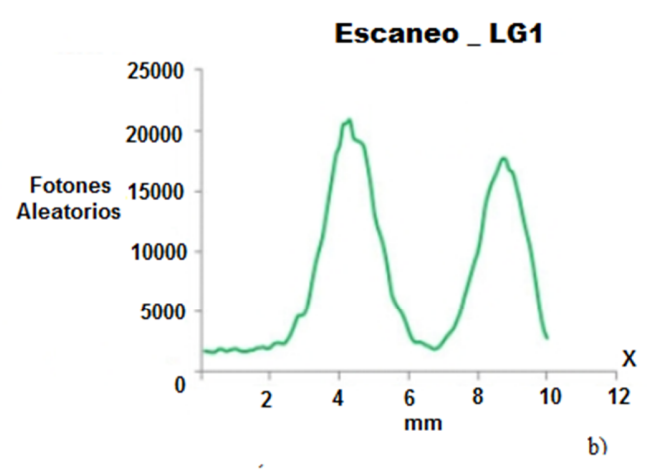
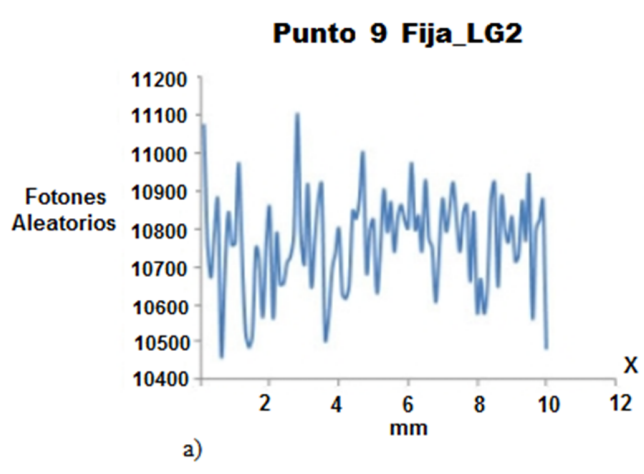
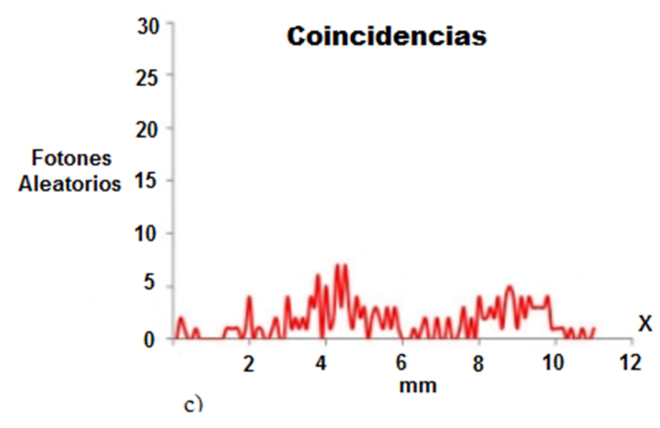
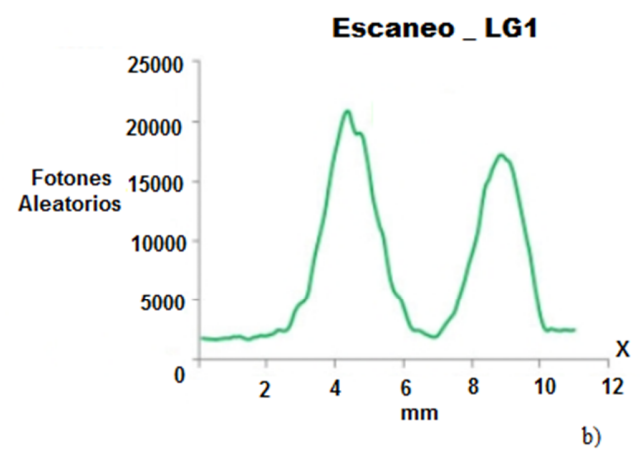
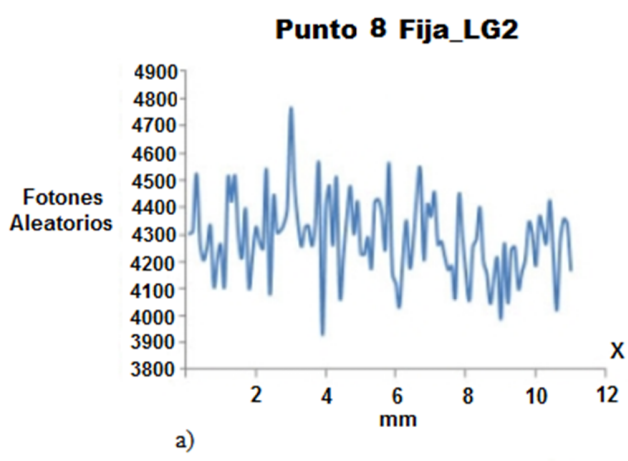


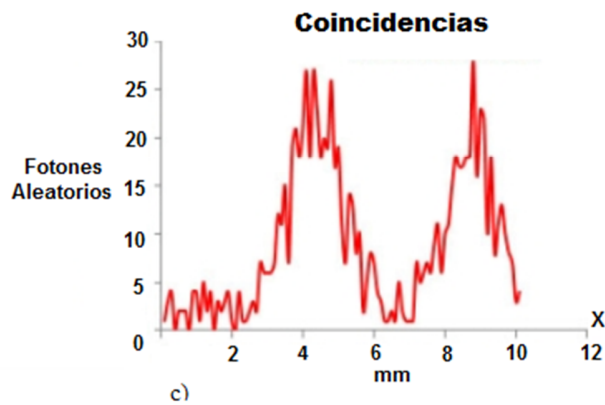
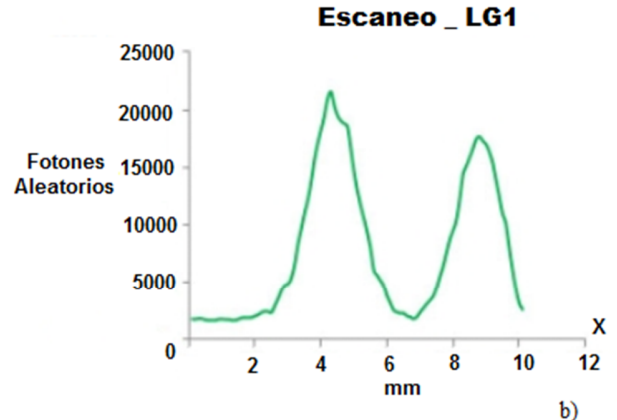
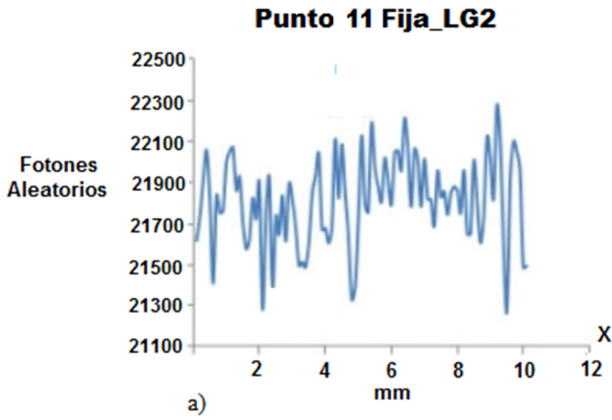
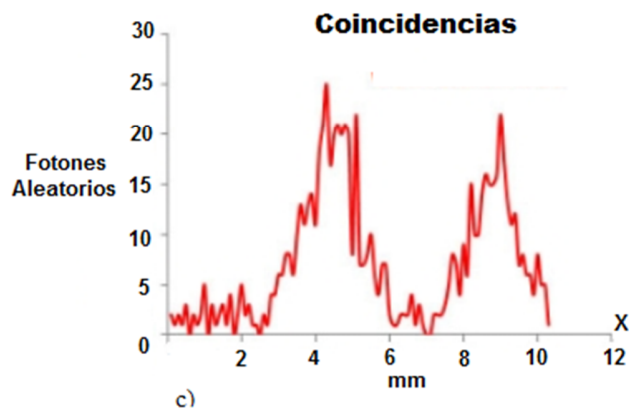
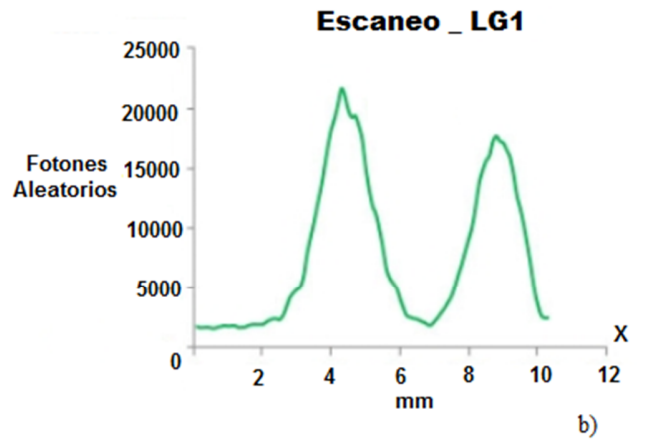
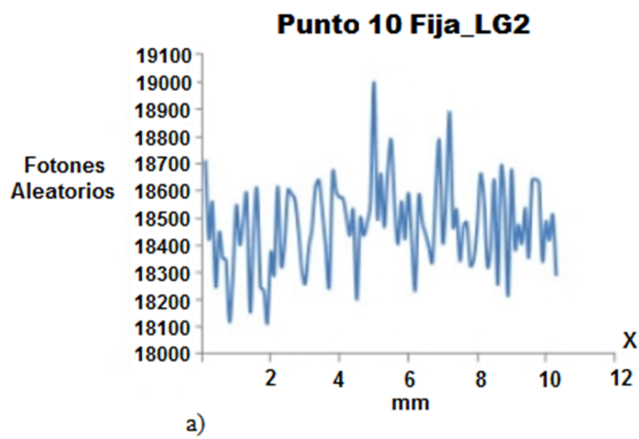
b)

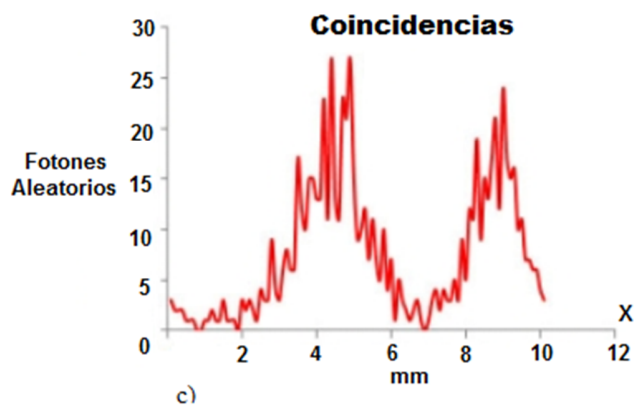
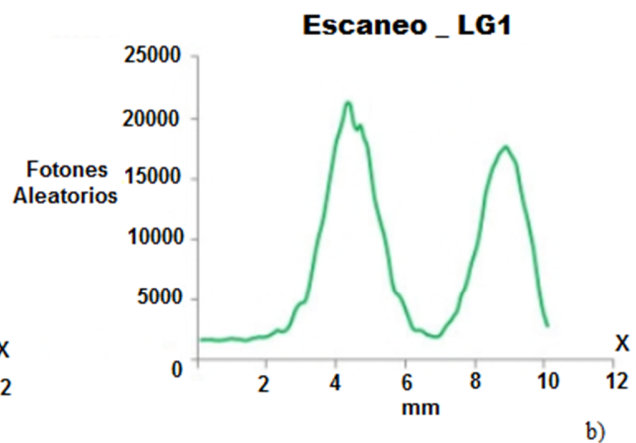
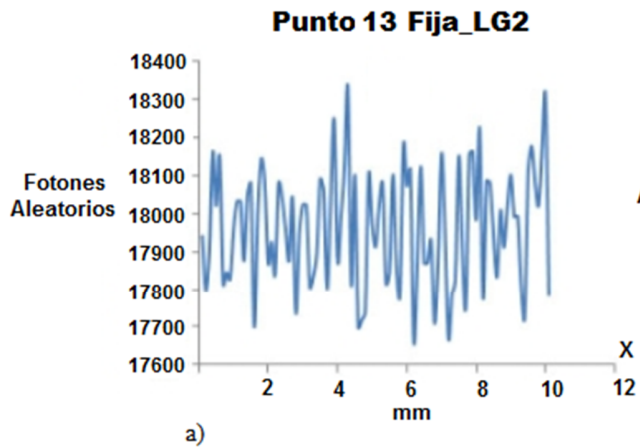
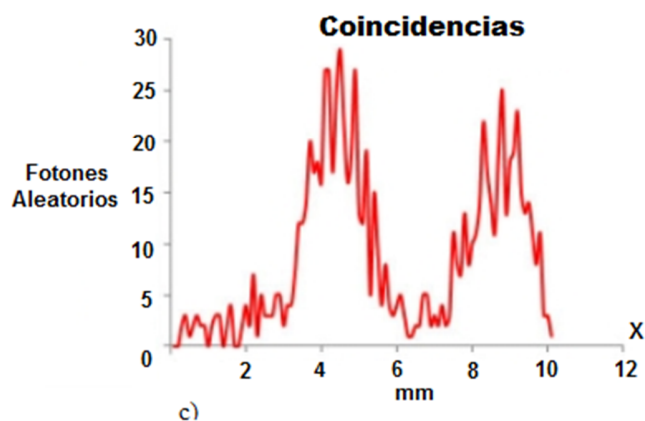
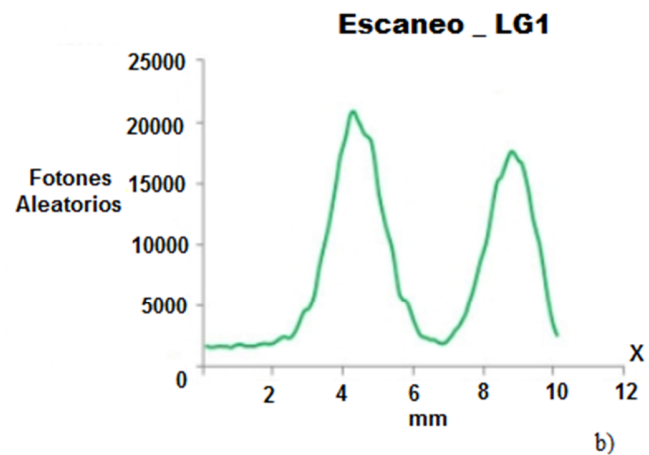
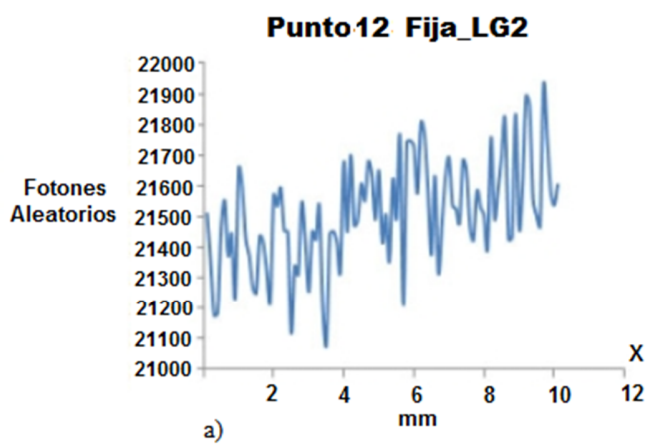


c)









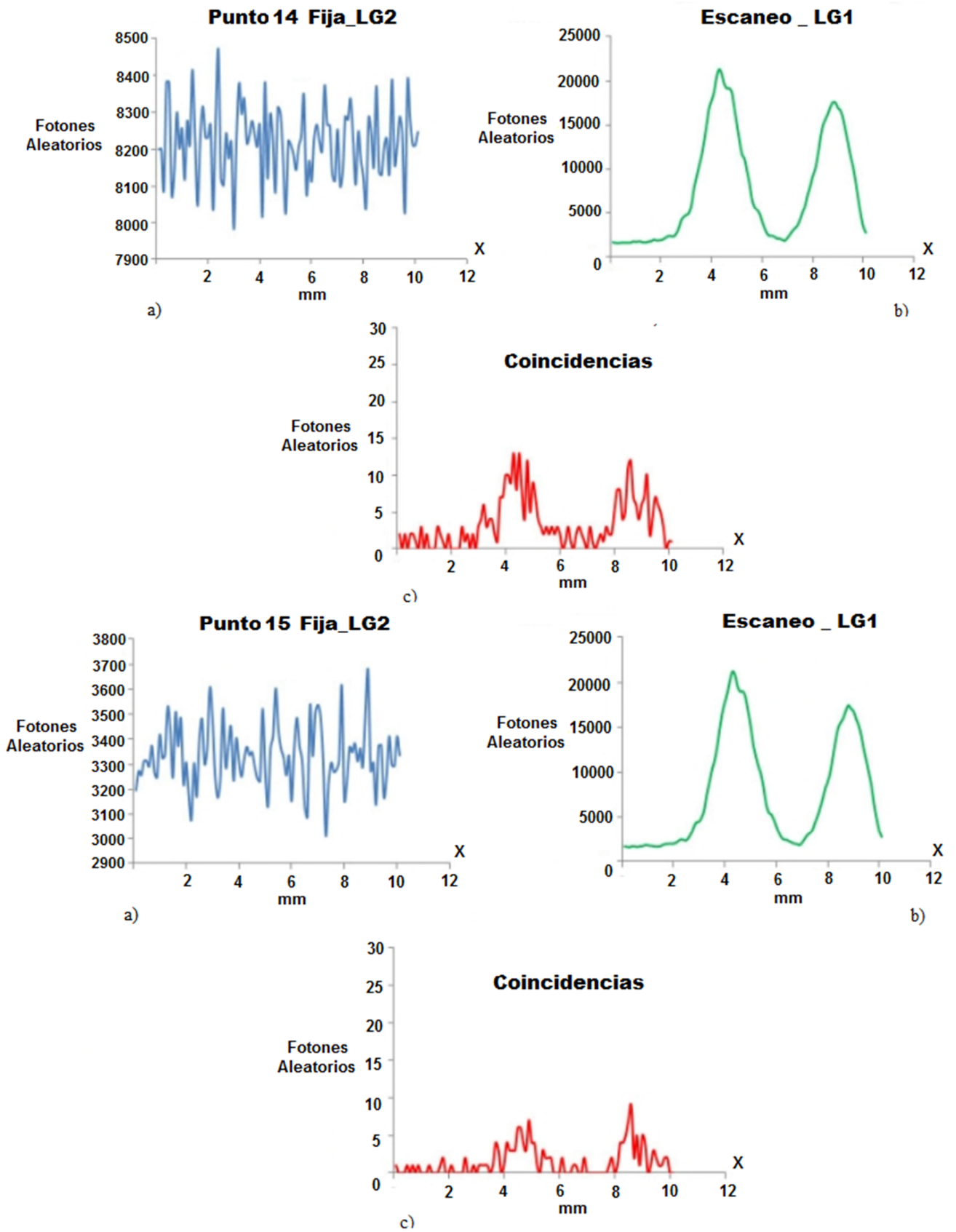


Figura 2.9. a) Cuentas individuales de la distribución LG2, b) Escaneo correspondientes a la distribución LG1, se mantiene invariante en todas las mediciones, c) coincidencias LG1-LG2.

Dados los resultados podemos observar los puntos donde hay mayor intensidad en la distribución LG2 y cuáles están correlacionadas con la distribución LG1. Estas correlaciones entre estas distribuciones se notan porque el patrón de difracción se reconstruye como se muestra en las gráficas en el inciso c) de coincidencias en los casos en los que el conteo del detector fijo es más alta. En las gráficas del **punto 9_LG2** al **punto 13_LG2** la curva de coincidencias se reconstruye el patrón de LG1 del Escaneo_LG1, por lo tanto, podemos decir con estos resultados que la correlación existe. Para poder decir qué tipos de correlación en específico se pueden encontrar, se necesita un estudio más detallado que no será una parte del alcance de este trabajo.

2.6 Características del experimento

Hasta el momento se han realizados pruebas experimentales del arreglo Optoelectrónico mostrando los cinco modos de distribución, y se tomaron dos modos para su análisis. De esta manera, hemos utilizados una parte de instrumentos manualmente para su manipulación en el receptor, teniendo en cuenta que el error humano es un factor que altera los resultados. Podemos obtener éstos resultados más precisos, con una resolución mayor, y en menor tiempo.

Se pretende automatizar el sistema de modo que podamos controlar desde la computadora las posiciones con una mayor resolución y variar sus velocidades, como también visualizar por la PC el conteo y las coincidencias. Del arreglo Optoelectrónico general, vamos a agregar en una de sus distribuciones un divisor de haz, y como se ha estudiado antes, queremos encontrar la correlación espacial en algunos de sus modos dadas por el divisor de haz, más adelante se explicaran con detalles el arreglo Optoelectrónico con el divisor de haz y sus instrumentos.

2.6.1 Rejilla de difracción

Ya que se pretende observar la correlación espacial entre los primeros modos de LG, es importante que la intensidad se encuentre en estos modos para que nuestros detectores capten la mayor cantidad de luz y los resultados sean más confiables. Además es importante que los detectores seleccionen un solo modo. Por estas razones se utiliza la rejilla con bifurcación +1s.

Existen diferentes técnicas para codificar MAO en luz. La que utilizaremos aquí, es a través de un medio difractado. Este medio es una rejilla con una discontinuidad espacial que produce un cambio angular en la distribución de la intensidad de la luz. Ésta discontinuidad tiene la forma de un tenedor en la rejilla. Con éste método un frente de onda gaussiano (de un láser) es difractado en los diferentes órdenes de momento angular orbital.

El máximo central no posee momento angular ($l=0$), el primer orden difractado posee momento angular $l=+1,-1$, y así, sucesivamente. Intuitivamente, la discontinuidad representada por la bifurcación del tenedor es

suficiente para producir un cambio angular en la distribución de la intensidad de luz. Esto quiere decir, que si dejamos únicamente ésta bifurcación de luz con momento angular orbital, en la que la magnitud del momento angular tendría que ver con el orden de la bifurcación presente (carga topológica) en el tenedor. Así, un MAO l dependerá del número de dientes que posea el tenedor.

En la figura 2.12 se muestra una bifurcación de tenedor con carga topológica uno, sólo una bifurcación. Para producir más de un orden, se utiliza el rayado de la rejilla. La rejilla por ella misma produciría un patrón de haces gaussianos cada uno un orden difractado del haz gaussiano original.

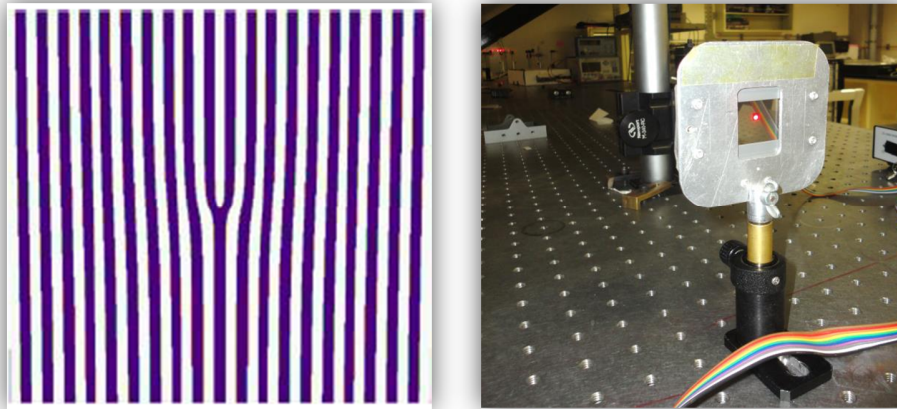


Figura 2.12. a) Rejilla de tenedor (o rejilla de difracción) con bifurcación $+1s$. b) rejilla montado en el arreglo experimental.

2.6.2 Divisor de Haz

Divide el haz incidente (LG) en un haz transferido y un haz reflejado, en este caso es un divisor de haz 50:50, por lo que, las intensidades de los rayos transmitido y reflejado son iguales. En las salidas del divisor se monta un colector de luz, se acopla a una fibra óptica multi-modo, el cual es para infrarrojo cercano. Los colectores son lentes que tienen un tratamiento anti-reflejante, lo cual las hace adecuadas para permitir máxima transmisión en la región del infrarrojo cercano, con esto se reducen pérdidas ópticas de las parejas de Momento Angular Orbital.

2.6.3 Fotodiodo de Avalancha (*Avalanche Photodiodes*, APDs)

Los detectores, (Avalanche Photodiodes, APDs), convierten la señal de un fotón a una señal eléctrica cuadrada con una amplitud de 4.5V y anchura de 20ns, tal como se muestra en la Figura 2.15 (véase en la pág. 29 en [19]). Un APD es una estructura *pipn* ver figura 2.14, la luz entra al diodo y se absorbe en la capa *n*, delgada y muy dopada. Entre la unión *i-p-n* se desarrolla una gran intensidad de campo eléctrico, por polarización inversa que causa ionización por impacto. Durante la ionización por impacto, un portador puede adquirir la energía suficiente para ionizar otros electrones enlazados. Estos portadores ionizados, a su vez, provocan más ionizaciones. El proceso continúa como en una avalancha y es de hecho equivalente a una

ganancia o multiplicación interna de portadores. En consecuencia, los APD son más sensibles que los diodos PIN y requieren menos amplificación adicional. Las desventajas de los APD son los tiempos de transito relativamente grandes, y ruido adicional generado internamente, debido al factor de multiplicación por avalancha [20].

La utilidad y aplicabilidad de las APD depende de muchos parámetros, algunos de los más importantes son: eficiencia cuántica, que es un indicador de cuánto son absorbidos los fotones incidentes y usados para generar portadoras de cargas primarias, la corriente total de fugas, que es la suma de la corriente de oscuridad, fotocorriente y ruido de oscuridad.

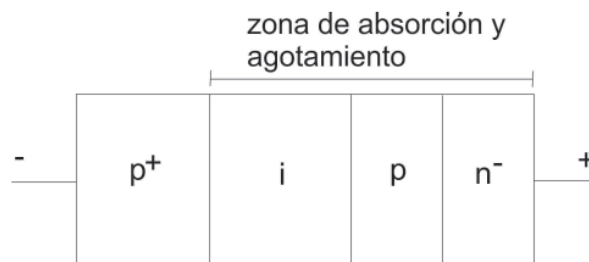


Figura 2.14. Estructura p-i-p-n de los Fotodiodos de Avalancha (APD).

El detector que se utiliza en el Laboratorio de Óptica Avanzada de la FC-UNAM para propósitos experimentales es el APD SPCM-AQ-4C, de PerkinElmer.



Figura 2.15. Señal producida por el sensor SPCM-AQ-4C.

2.6.4 Tecnología SPCM

Los módulos SPCMs cuentan fotones con un fotodiodo de avalancha (APD), un dispositivo basado en silicio de estado sólido , que convierte los fotones en electrones (ver figura 2.16). A diferencia de fotodiodos ordinarios, los APDs operan con una ganancia interna. Los Fotones individuales producen los llamados electrones primarios, estos electrones acelerados por un campo eléctrico de alta generan aún más electrones, lo que crea un efecto de avalancha, el resultado neto es una señal que es proporcional a la intensidad de la luz. El PerkinElmer SPCM utiliza un APD que se encuentra a 200 micras de diámetro y funciona a 20 voltios por encima tensión de ruptura. En este caso, el proceso de multiplicación es tan intenso que resulta en una ganancia equivalente del orden de 108. Desde una ganancia a este nivel no se puede mantener sin quemar el dispositivo, el SPCM viene con un circuito electrónico que detecta la corriente y repetidamente sacia con un pulso TTL.

El funcionamiento en este modo de recuento de fotones es extremadamente rápido, lo que permite contar un fotón cada 50 nanosegundos. Por lo tanto, SPCMs son particularmente eficaces cuando se utilizan en conjunción con los láseres. El dispositivo funciona mejor con tamaños de muestra que menos de un milímetro. SPCMs pueden detectar la luz emitida desde muy pequeños volúmenes, centilitros de diámetro. No obstante, el dispositivo alcanza velocidades de hasta 1 millón de cuentas por segundo en cada canal, con un " tiempo muerto" de 50 nanosegundos entre pulsos [21].



Figura 2.16. Fotodiodo de avalancha utilizado en los experimentos.

2.6.5 Detector SPCM-AQ4C

El SPCM- AQ4C es una tarjeta de recuento de fotones de 4 canales capaz de detectar fotones individuales de la luz en el rango de longitud de onda de 400 nm a 1060 nm. Cada canal es independiente de los otros (ver figura 2.17).

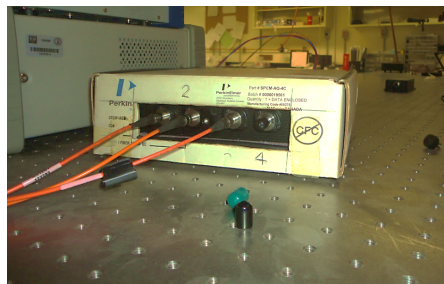


Figura 2.17. Fotodiodo de avalancha.

El SPCM - AQ4C utiliza un fotodiodo de avalancha de silicio único (Slik™) que tiene un área activa circular de 180 μm con una eficiencia de detección de picos de fotones superior al 60% a 650 nm (ver figura 2.18).

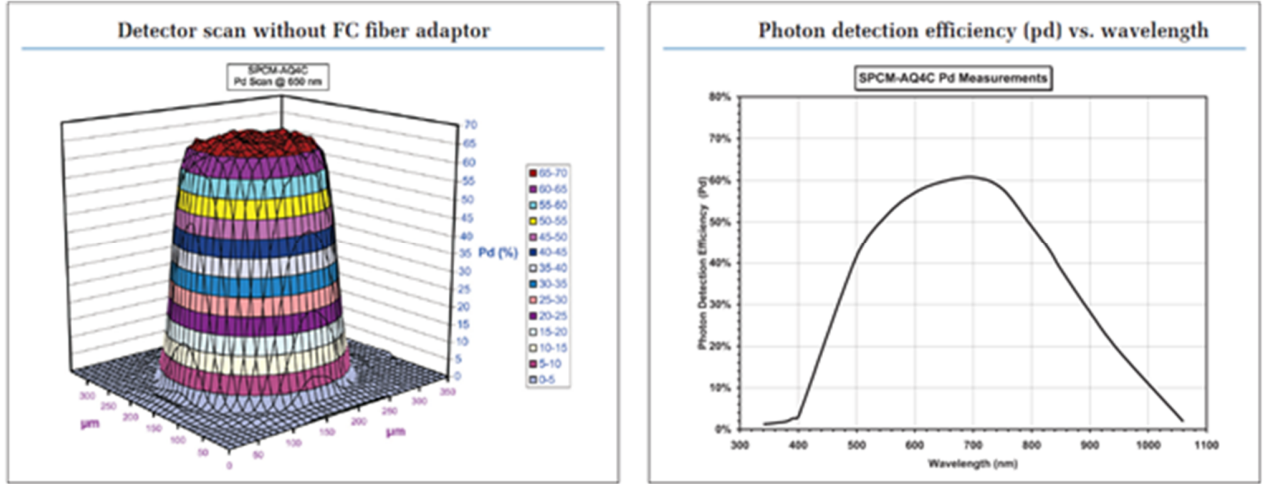
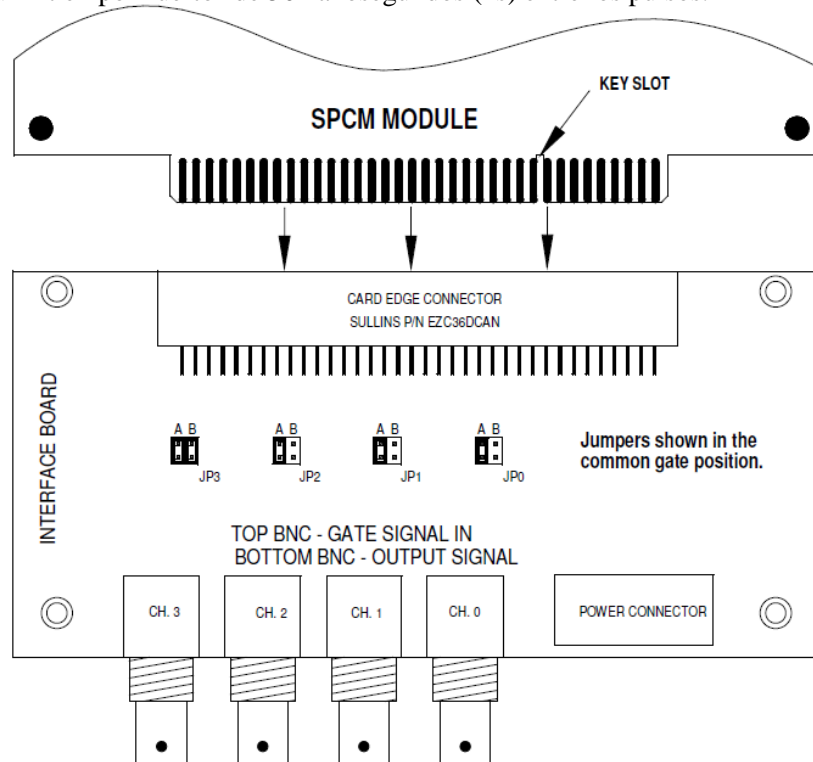


Figura 2.18. Eficiencia en la detección de fotones (pd) vs longitud de onda.

Cada fotodiodo es tanto termoelectricamente enfriado y de temperatura controlada, garantizando un rendimiento estabilizado pesar de los cambios en la temperatura ambiente. La tarjeta SPCM - AQ4C utiliza un circuito mejorado con una tasa de recuento pico $> 4 \text{ M c / s}$ para las explosiones cortas de tiempo en los 4 canales y una tasa de recuento de $1,5 \text{ M c / s}$ para un funcionamiento continuo. El sistema cuenta con su propia interfaz que facilita conectar las conexiones de alimentación y de señal a los módulos SPCM - AQ4C (ver figura 2.19). Hay un " tiempo muerto" de 50 nanosegundos (ns) entre los pulsos.



INDEPENDENT GATE INPUT JUMPER SETTINGS			COMMON GATE INPUT JUMPER SETTINGS		
Jumper	Position A	Position B	Jumper	Position A	Position B
JP0	--	X	JP0	X	--
JP1	--	X	JP1	X	--
JP2	--	X	JP2	X	--
JP3	--	X	JP3	X	X

Figura 2.19. Configuración del jumper para el control de la compuerta

La salida de cada canal (un pulso TTL) que es de 4,5 voltios de alto (en una carga de 50 Ω) y 20 ns de ancho que está disponible en el borde de la tarjeta detrás de la placa de circuito (ver figura 2.20). Cada pulso TTL corresponde a un fotón detectado. Todas las señales de entrada y de salida están disponibles en el conector de la tarjeta [22].

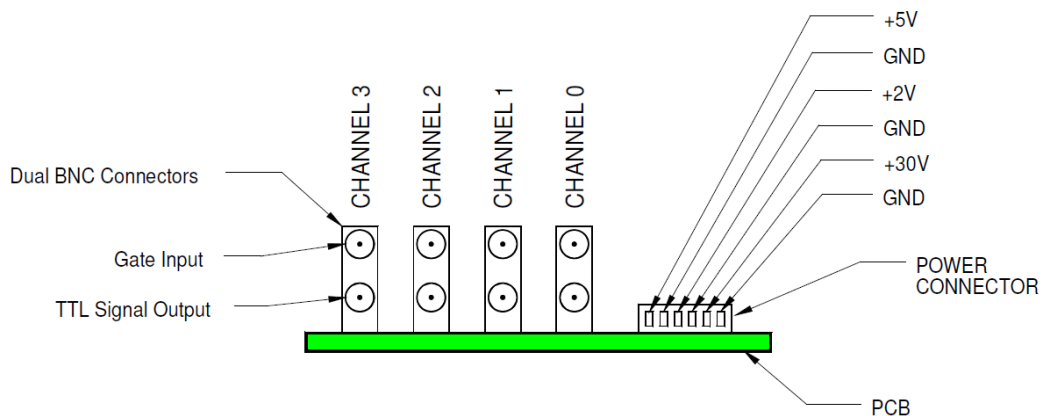


Figura 2.20. Señal y conexiones de alimentación vista trasera.

El módulo requiere 2 voltios, 5 voltios, y fuentes de alimentación de 30 voltios, en la Figura 2.21 se muestra las conexiones del cableado.

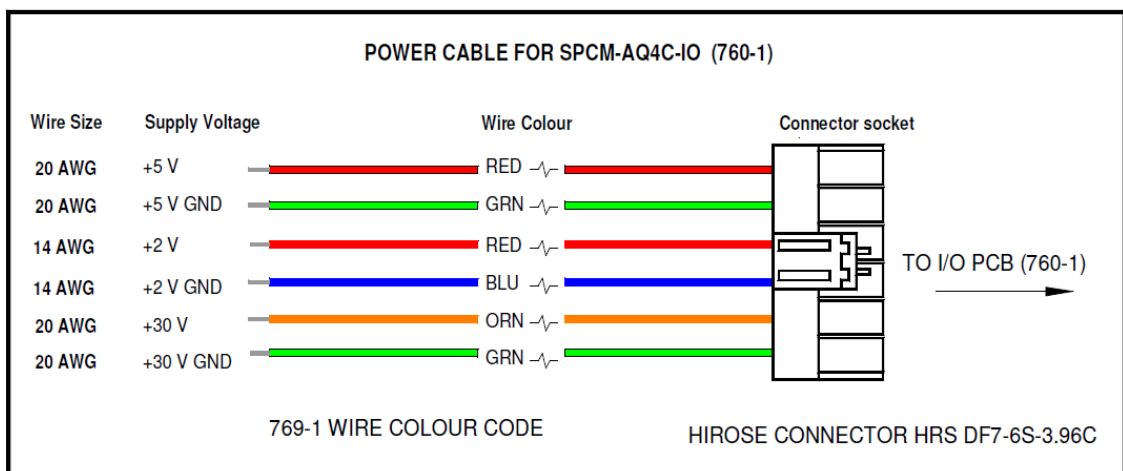


Figura 2.21. Cableado de alimentación de conectores.

Tomando en cuenta lo siguiente:

- los cables deben ser lo más corto posible para minimizar las caídas de tensión en los cables.
- Minimizar los posibles lazos de tierra mediante la conexión de los cables de tierra en un solo punto.
- Las fuentes de alimentación que usted elija debe estar bien regulado y bajo ruido. Rizado y ruido deben mantenerse por debajo de 50 mV p-p.
- Cada canal de recuento de fotones está internamente protegido de sobrecargas de corriente.

Sin embargo, siempre es prudente utilizar fuentes de alimentación que son capaces de limitación de corriente a la corriente máxima especificada para cada módulo, en la Figura 2.22 vemos como se encuentra conectado físicamente en las salidas de los canales con su alimentación.



Figura 2.22. Fuentes de alimentación externa para los módulos.

2.7 Propuesta para la solución del problema

A continuación se presenta la descripción del Sistema de Adquisición de Datos (SAD) del robot, el cual consta de: un hardware, un firmware y un software.

2.7.1 Arreglo Optoelectrónico con Divisor de haz para el conteo y correlación de fotones con MAO

Para este arreglo con divisor de haz los colectores 1 y 2 son posicionados a lo largo del diámetro vertical en la dislocación $l = -2$, de forma que el haz transmitido y reflejado se encuentre su correlación espacial con MAO junto con el colector 1 (Figura 2.10), el procedimiento es el mismo como descrito anteriormente y mostrado en la Figura 2.8. Las fibras ópticas se encuentran conectadas a los puertos de entrada de los APDs mediante conectores tipo FC. De esta manera la luz, cadena de fotones, es enviada a los APDs.

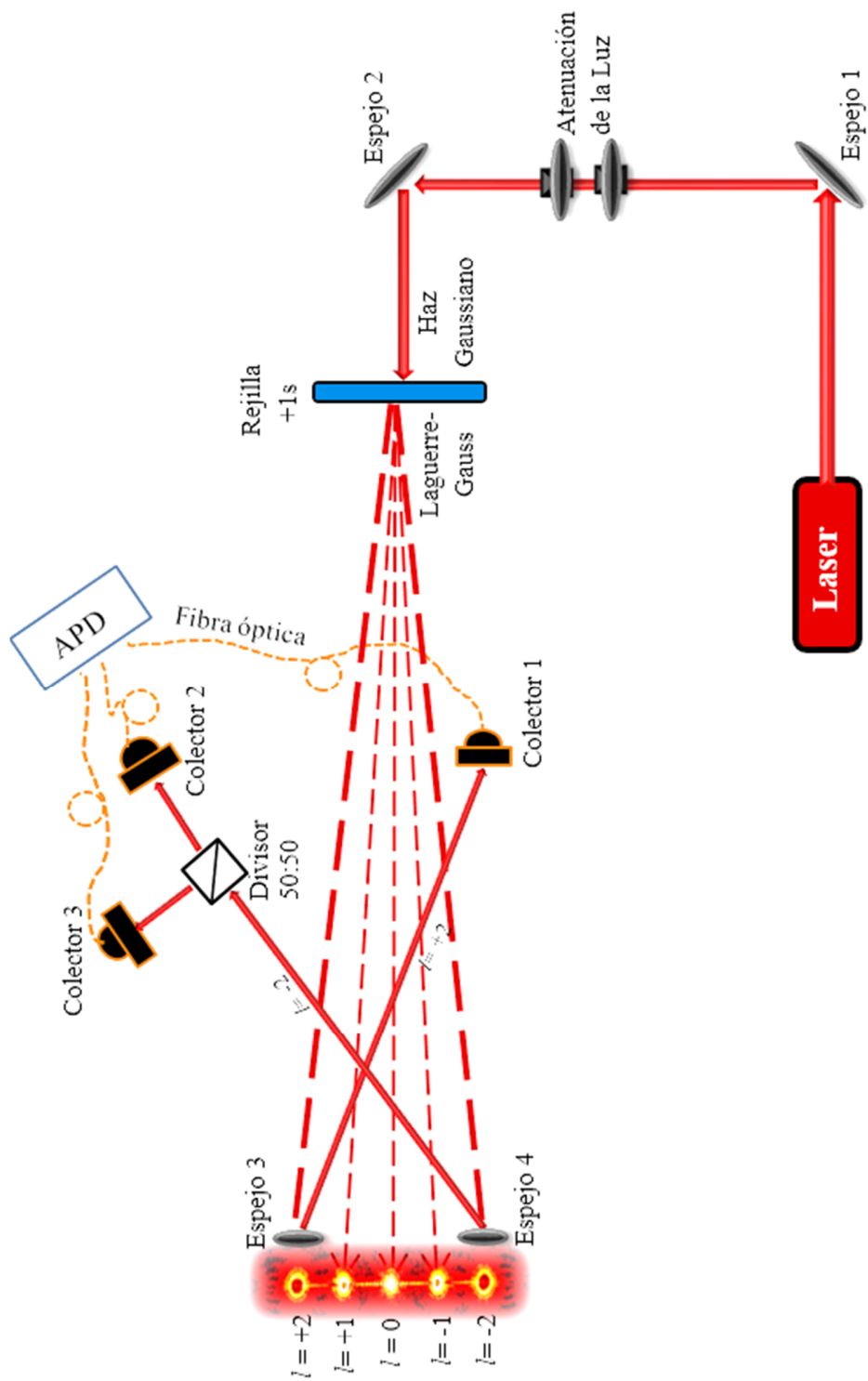


Figura 2.10. Arreglo del experimento con un divisor de haz para el conteo y correlación del haz transmitido y reflejado de $l=-2$ con $l=+2$.

2.7.2 Configuración de la detección

La configuración de la detección de fotones se muestra en la Figura 2.23. En esta configuración se conecta la fibra óptica diseñada para la luz, hacia el Fotodiodo de avalancha (APD) de la Figura 2.20, se debe alinear la lente con la fibra de tal manera que pase la mayor cantidad de luz. Los fotodiodos de avalancha o (Avalanche Photodiodes, APDs) son foto detectores que se pueden considerar como el equivalente semiconductor de los fotomultiplicadores.

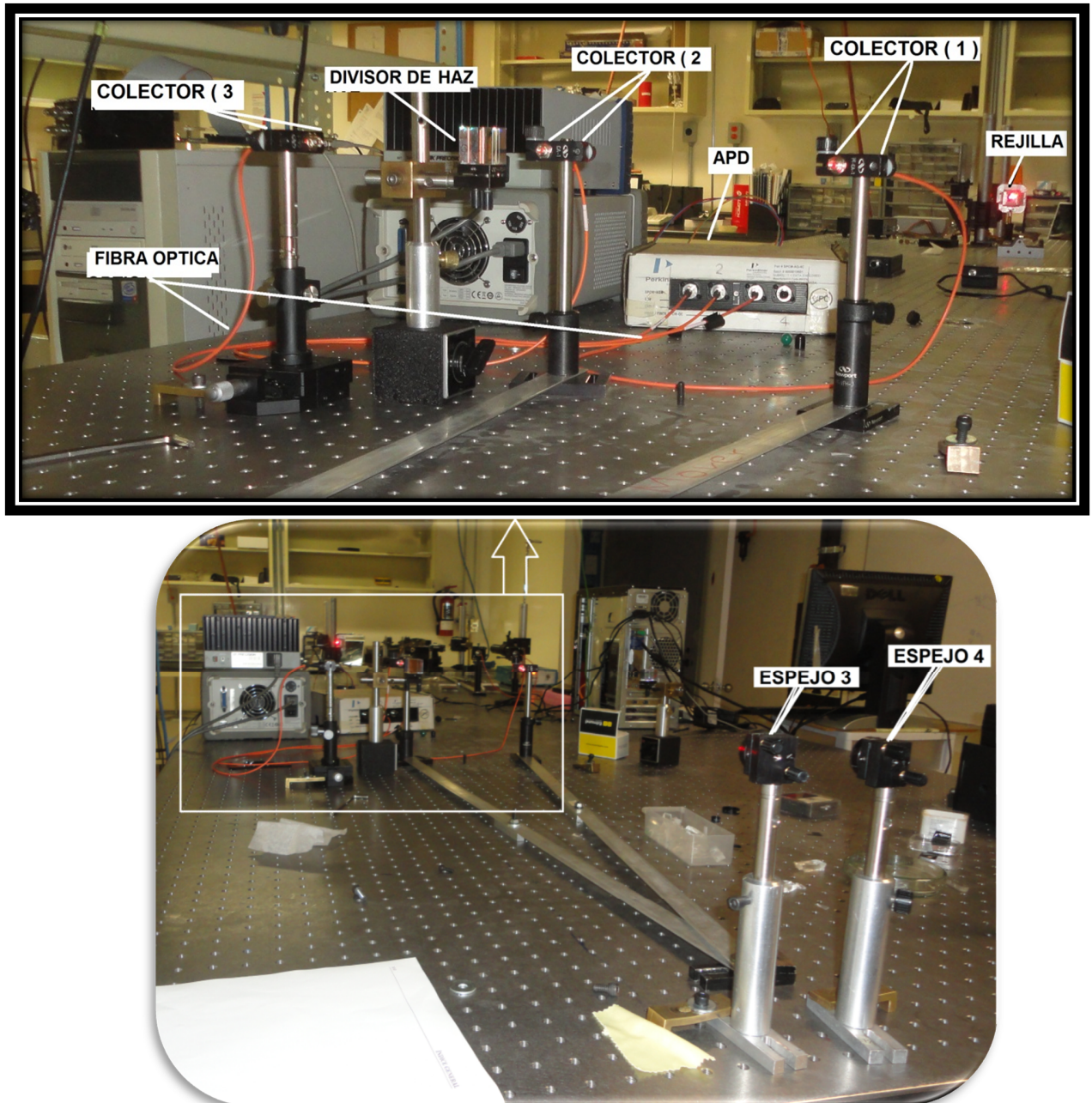


Figura 2.23. Configuración de la detección de fotones.

2.7.3 Robots cartesianos de tres Grados de libertad

Para este experimento, surge la necesidad de diseñar tres robots cartesianos de dos grados de libertad. El robot para su posicionamiento se muestra en la Figura 2.24, el cual es un sistema para hacer recorridos en el primer cuadrante del sistema cartesiano y que se puede mover a una velocidad de 1 a 100 micras/seg, por lo que implementaremos un sistema de posicionamiento piezoeléctrico que nos pueda dar una mayor resolución en nm para el eje X. Este último detalle es importante, ya que los diferentes patrones de difracción miden en milímetros, y de esta manera se pueden hacer mediciones muy precisas. En el capítulo 3, se darán los detalles del diseño mecánico y su modelo dinámico del robot para dos grado de libertad.

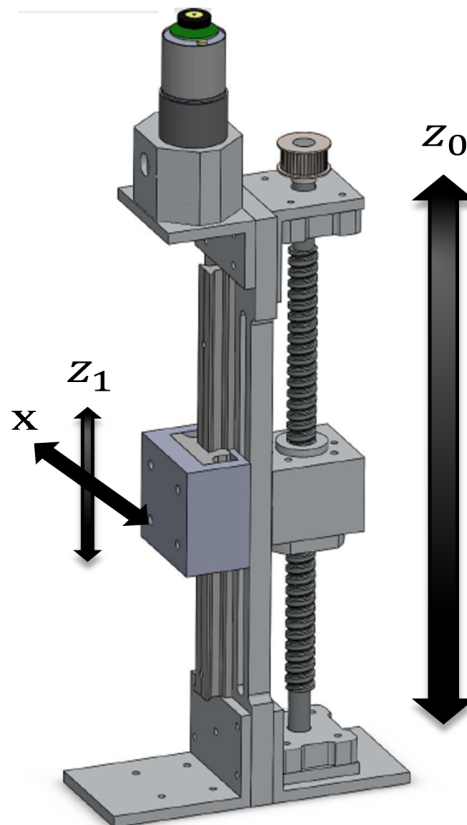


Figura 2.24. a) Robot de posicionamiento dinámico eje Z0, b) Motor Piezoeléctrico 12vcd eje X

2.8 Conclusiones

Para este capítulo explica detalladamente el experimento Optoelectrónico, además de comprender el fenómeno cuántico, se montó de manera experimental y se hizo el arreglo de tal manera de llegar a obtener el patrón de interferencia con Momento Angular Orbital, el objetivo principal fue obtener resultados previos en forma manual de coincidencias y correlación de fotones, y se llega a la conclusión que la necesidad principal para este experimento es diseñar y construir tres posicionadores de alta precisión.

CAPÍTULO 3

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE ROBOT POSICIONADOR

3.1 Introducción

El sistema de detección consiste en diseñar y construir tres robots de alta precisión con eficiencia cuántica para recibir las señales y estudiar los conteos de fotones con diferentes Momento Angular. Las señales se obtienen del arreglo Optoelectrónico cuántico del experimento, el cual del sistema de detección son enviadas al sistema electrónico para su procesamiento y análisis. Antes del diseño se desarrolla el modelo dinámico del robot, esto para poder tener una visión más amplia de las características como la masa, fuerzas que actúan, etc, en las siguientes secciones se verán cómo obtener un modelo más óptimo de controlador.

La obtención de este modelo para mecanismos de uno o dos grados de libertad no es excesivamente compleja, pero a medida que el número de grados de libertad aumenta el planteamiento y obtención del modelo se complica enormemente. Por este motivo no siempre es posible obtener un modelo dinámico expresado de una forma cerrada, esto es, mediante una serie de ecuaciones, normalmente del tipo diferencial de segundo orden, cuya integración permita conocer que el movimiento surge al aplicar unas fuerzas o que fuerzas hay que aplicar para obtener un movimiento determinado.

3.2 Características del robot

El posicionado se hace en el espacio de trabajo con las articulaciones prismáticas. Esta configuración se usa bien cuando un espacio de trabajo es grande y debe cubrirse, o cuando la exactitud consiste en la espera del robot. Posee para tres movimientos lineales, es decir, se puede configurarse para tres grados de libertad, los cuales corresponden a los movimientos localizados en los ejes x , $z0$, $z1$.

Los movimientos que realiza este robot entre un punto y otro son con base en interpolaciones lineales. Interpolación, en este caso, significa el tipo de trayectoria que realiza el manipulador cuando se desplaza entre un punto y otro. A la trayectoria realizada en línea recta se le conoce como interpolación lineal y a la trayectoria hecha de acuerdo con el tipo de movimientos que tienen sus articulaciones se le llama interpolación por articulación. Antes de diseñar y especificar las partes que compondrán al robot es necesario comprender las características principales del robot.

3.2.1 Especificaciones de diseño

La tabla 1.1 muestra las especificaciones que debe cumplir para el diseño del robot.

Estructura mecánica:	Tipo Cartesiano
Grados de libertad (GDL):	1 GDL (adaptable para 3GDL)
Rango de movimiento:	Eje z (vertical)
Realimentación:	Encoder de cuadratura con una resolución de 64 pulsos por revolución del eje del motor.
Actuadores:	Motor de C.D. 12VCD con una caja de engranajes de metal 131.25:1.
Capacidad de los motores:	80 RPM y 300 mA funcionando libremente, 250 oz-in (18 kg-cm) y hasta 5A puesto.
Transmisión:	Poleas y bandas para acople.
Precisión en el movimiento lineal:	-Riel para guía lineal de 15mm -Bloque lineal para Guía de 15mm. -Tornillo embalado C/Tuerca de 16 mm.
Carga máxima:	20g hasta 1.5 kg (eje Z)
Altura máxima del robot:	0.40 m
Distancia máxima eje z:	0.34 m
Resolución de movimiento del robot:	10 μ m - 100 μ m
Masa del robot	3.1 kg.

1.2.1 **Tabla 1.1.** Especificaciones del robot.

3.2.2 Configuración del espacio de trabajo

Tomamos la disposición de los eslabones y articulaciones como se muestra en la Figura 3.1. Dado que es una configuración cartesiana.

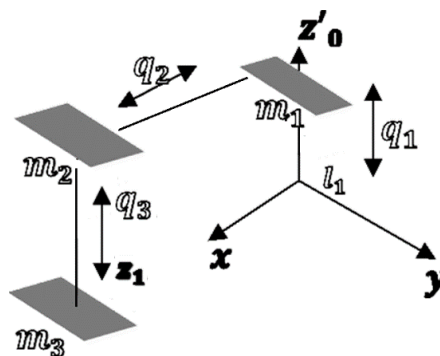


Figura 3.1. Configuración cartesiana

3.3 Modelo cinemático y dinámico del robot

3.3.1 Método de Euler-LaGrange

Las ecuaciones de movimiento de Euler-lagrange son un conjunto de ecuaciones diferenciales que describen la evolución en el tiempo de un sistema mecánico. Considérese un robot manipulador de n eslabones, la energía total E de un robot manipulador de n grados de libertad es la suma de sus energías cinéticas K y potencial U :

$$E(q, \dot{q}) = K(q, \dot{q}) + U(q) \quad Ec(3.1)$$

Donde $q \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ es el vector de coordenadas articulares y $\dot{q} \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ es el vector de velocidades articulares. El lagrangiano de un robot de n grados de libertad es la diferencia entre su energía cinética K y su energía potencial U .

$$L(q, \dot{q}) = K(q, \dot{q}) - u(q) \quad Ec(3.2)$$

Las ecuaciones de movimiento de Euler-LaGrange para un manipulador de n grados de libertad, está definida por:

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}} \right] - \frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial q} = \tau \quad Ec(3.3)$$

Equivalente tenemos que:

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}_i} \right] - \frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial q_i} = \tau_i, \quad i = 1, \dots, n \quad Ec(3.4)$$

Donde τ , son los pares aplicados a cada articulación por los actuadores.

Tomamos la disposición de los eslabones y articulaciones como se muestra de acuerdo a las siguientes necesidades [23]. En la Figura 3.1 se muestra la configuración del robot cartesiano, a partir de ésta, necesitamos obtener las ecuaciones matemáticas que describen la cinemática del robot.

El modelo de la cinemática directa de un robot cartesiano está dado por:

$$\begin{bmatrix} z'_1 \\ x_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_1 + l_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} z'_2 \\ x_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_1 + l_1 \\ q_2 \\ l_1 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} z'_3 \\ x_3 \\ z_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_1 + l_1 \\ q_2 \\ q_3 + l_1 \end{bmatrix},$$

Solo existe energía de traslación en los tres ejes, la ecuación de la energía cinética queda expresada de la siguiente manera:

$$K(q, \dot{q}) = \frac{mv^2}{2}$$

La velocidad está dada por:

$$v = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix},$$

Obtenemos las velocidades de nuestro sistema:

$$V_1 = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} z'_1 \\ x_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} q_1 + l_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$V_2 = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} z'_2 \\ x_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} q_1 + l_1 \\ q_2 \\ l_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$V_3 = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} z'_3 \\ x_3 \\ z_3 \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} q_1 + l_1 \\ q_2 \\ q_3 + l_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix}$$

La rapidez la obtenemos de este modo:

$$V^2 = \|V\|^2 = V^T V = [V_1 \ V_2 \ V_3] \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix}$$

Elevamos al cuadrado las funciones para encontrar las velocidades:

$$V_1^2 = \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \dot{q}_1^2$$

$$V_2^2 = \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ 0 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ 0 \end{bmatrix} = \dot{q}_1^2 + \dot{q}_2^2$$

$$V_3^2 = \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} = \dot{q}_1^2 + \dot{q}_2^2 + \dot{q}_3^2$$

El siguiente paso es encontrar las ecuaciones de la energía cinética para cada grado de libertad:

$$K_1(q, \dot{q}) = \frac{m_1 \dot{q}_1^2}{2}, \quad Ec(3.5)$$

$$K_2(q, \dot{q}) = \frac{m_2 (\dot{q}_1^2 + \dot{q}_2^2)}{2}, \quad Ec(3.6)$$

$$K_3(q, \dot{q}) = \frac{m_3(\dot{q}_1^2 + \dot{q}_2^2 + \dot{q}_3^2)}{2}, \quad Ec(3.7)$$

Se suman todas las energías y tenemos que la energía cinética total queda expresada como:

$$K(q, \dot{q}) = \frac{m_1 \dot{q}_1^2}{2} + \frac{m_2(\dot{q}_1^2 + \dot{q}_2^2)}{2} + \frac{m_3(\dot{q}_1^2 + \dot{q}_2^2 + \dot{q}_3^2)}{2}$$

Reacomodando la ecuación con sus términos quedaría:

$$K(q, \dot{q}) = \frac{1}{2}m_1\dot{q}_1^2 + \frac{1}{2}m_2\dot{q}_1^2 + \frac{1}{2}m_2\dot{q}_2^2 + \frac{1}{2}m_3\dot{q}_1^2 + \frac{1}{2}m_3\dot{q}_2^2 + \frac{1}{2}m_3\dot{q}_3^2$$

Factorizamos la ecuación:

$$K(q, \dot{q}) = \frac{(m_1 + m_2 + m_3)}{2}\dot{q}_1^2 + \frac{(m_2 + m_3)}{2}\dot{q}_2^2 + \frac{(m_3)}{2}\dot{q}_3^2$$

Por otra parte la energía potencial queda directamente como:

$$U(q) = (m_3)g(q_3 + l_1) \quad Ec(3.8)$$

Con la energía cinética y la energía potencial obtenemos el Lagrangiano:

$$L(q, \dot{q}) = K(q, \dot{q}) - U(q)$$

$$L(q, \dot{q}) = \frac{(m_1+m_2+m_3)}{2}\dot{q}_1^2 + \frac{(m_2+m_3)}{2}\dot{q}_2^2 + \frac{(m_3)}{2}\dot{q}_3^2 - (m_3)g(q_3 + l_1) \quad Ec(3.9)$$

Lo siguiente es encontrar las ecuaciones de movimiento de Euler- LaGrange con la siguiente ecuación:

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}_i} \right] - \frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial q_i} = \tau_i, \quad i = 1, \dots, n \quad Ec(3.10)$$

De esta manera, realizando las operaciones de la Ec(3.10), las ecuaciones dinámicas que modelan las fuerzas aplicadas en cada unión del robot quedan expresadas como:

$$\tau_1 = (m_1 + m_2 + m_3)\ddot{q}_1 \quad Ec(3.11)$$

$$\tau_2 = (m_2 + m_3)\ddot{q}_2 \quad Ec(3.12)$$

$$\tau_3 = (m_3)\ddot{q}_3 + (m_3)g \quad Ec(3.13)$$

3.4 Diseño y construcción mecánica del robot

Para el diseño del robot se toman en cuenta las características mencionadas (en tabla 1.1) y las dimensiones por la que la luz cuántico con MAO son obtenidas del arreglo optoelectrónico. Para el diseño de la estructura del robot se utilizó como herramienta en CAD el SolidWork Premium 2013, ya que tiene la ventaja de aportar con rapidez al diseño y garantiza la precisión con herramientas industriales especializadas y permite modelar piezas, simular y extraer de ellos tanto planos técnicos como otro tipo de información necesaria para

la producción, es un software que funciona en base con las nuevas técnicas de modelado con sistemas CAD. Antes de definir el diseño del robot, se definieron las dimensiones por la cual debemos montar el robot. Dicho lo anterior, se llevó a cabo investigar los materiales que me proporcione dicha precisión, a continuación detallamos los materiales y fabricación del robot.

3.4.1 Tornillo embalado

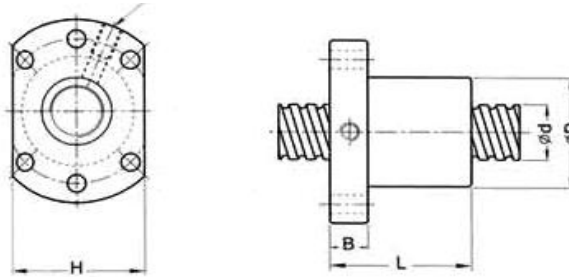
Un eje roscado proporciona un camino de rodadura helicoidal a unos rodamientos de bolas que actúan como un tornillo de precisión. Como el movimiento se realiza por rotación, no por deslizamiento, el rozamiento es menor, la fricción del conjunto es baja. Y como el esfuerzo se reparte entre varias bolas, es capaz de aplicar o resistir altas cargas de empuje. Se pueden fabricar con unas tolerancias estrechas y por tanto son adecuados para su empleo donde se necesita una alta precisión. El conjunto de bolas actúa como la tuerca mientras el eje roscado es el tornillo. En contraste con los husillos convencionales, los husillos a bolas tienden a ser bastante voluminoso, debido a la necesidad de disponer un espacio en el mecanismo para recircular las bolas.

Alta precisión ejes de los tornillos tiene habitualmente una precisión de 830 nanómetros por centímetro (1/1000 de una pulgada por pie) o mejor. Los ejes de los husillos de instrumento de calidad suelen tener una precisión de 250 nanómetros por centímetro. Se fabrican en máquinas de fresado de precisión con equipo de medición óptica de distancia y herramientas especiales. Se utilizan máquinas similares para producir lentes ópticas y espejos. La baja fricción de los husillos de bolas se traduce en una alta eficiencia mecánica en comparación con otras alternativas. Un husillo de bolas usuales puede alcanzar una eficiencia del 90%, en comparación con el 50% de un husillo Acme de igual tamaño. La falta de fricción de deslizamiento entre la tuerca y el tornillo permite una larga vida útil del conjunto del husillo (especialmente en los sistemas sin holgura), la reducción de los tiempos entre mantenimiento y sustitución de piezas y a la disminución de las necesidades de lubricación. Esto, combinado con la mejora del rendimiento global y la reducción del consumo energético pueden permitir compensar los mayores costes de adquisición de los husillos a bolas.



Figura 3.2. Tornillo embalado

Tornillo de bolas con cuerda rodada, dimensiones:



l: Lead Da: Ball Dia. n: Number of Circuits K: Stiffness (Kgf/cm)

Type	Dimensions								
	d	l	Da	D	A	B	L	W	X
1605-3	16	5	3.175	28	48	10	42	38	5.5

unit: mm

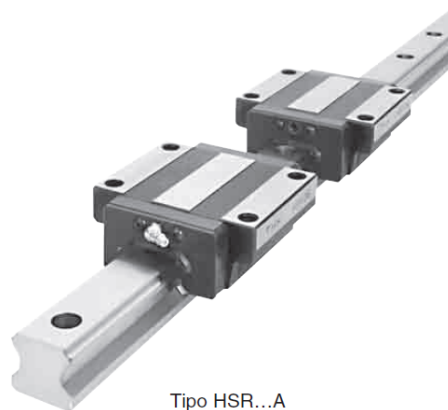
Ca: Basic Dynamic Rating Load (Kgf) Coa: Basic Static Rating Load (Kgf)

G	H	Q	n	Ca	Coa	K
44	40	M6	4	780	1790	20

Figura 3.3. Dimensiones del tornillo embalado

3.4.2 Riel de precisión tipo HSR

Tipo estándar



Tipo HSR...A
(Tipo para carga pesada)

Figura 3.4. Guía de movimiento lineal tipo HSR

Las bolas ruedan a lo largo de las cuatro hileras de los anillos de rodaduras rectificadas formadas entre el riel de movimiento lineal HSR y el bloque de movimiento lineal **HSR15A1SS**. Las placas del extremo instaladas en ambos extremos del bloque de movimiento lineal hacen que las bolas circulen a lo largo de las pistas de rodamientos. Las placas de contención retienen las bolas para que no se caigan cuando se quita el bloque de movimiento lineal del riel de movimiento lineal. El bloque de movimiento lineal de bajo perfil está diseñado para ser altamente rígido de manera tal que el movimiento lineal sea muy preciso y constante.

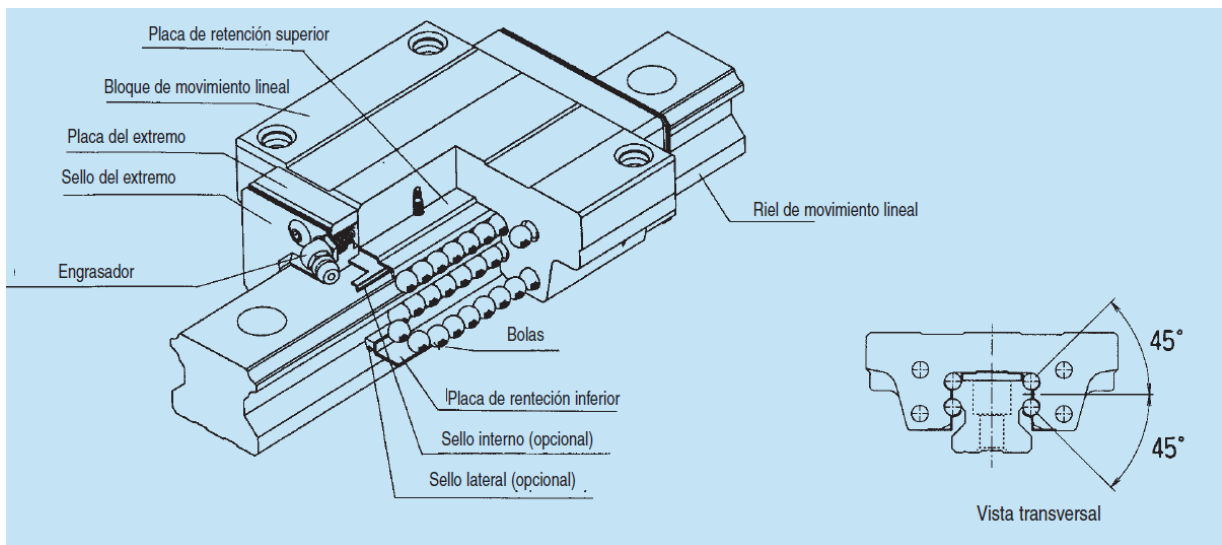


Figura 3.5. Construcción de la guía de movimiento lineal tipo HSR.

Tabla 1.2 Características del guía de movimiento lineal de alta precisión

<p>IGUAL VALOR DE CARGA EN LOS 4 SENTIDOS</p>	<p>Cada hilera de bolas está dispuesta en un ángulo de contacto de 45° para que la guía de movimiento lineal tenga iguales valores de carga en las direcciones radiales, radial inversa y lateral. Esto permite que las guías de movimiento lineal tipo HSR operen efectivamente en cualquier orientación de montaje en un amplio rango de aplicaciones.</p>
<p>ALTA RIGIDEZ</p>	<p>Si la disposición de las cuatro-hileras de bolas está bien-equilibrada, a la guía de movimiento lineal se le puede dar una precarga suficiente. Esto permite que se aumente la rigidez de la guía de movimiento lineal sin ningún daño colateral.</p> <p>Los pernos de montaje y el bloque de movimiento lineal están diseñados para ser fuertes de modo que las guías de movimiento lineal tipo HSR se puedan usar en máquinas herramientas de trabajo pesado.</p>
<p>CAPACIDAD DE AUTO-AJUSTE</p>	<p>La disposición cara-a-cara de las ranuras de arco circular brinda una capacidad de auto-ajuste. Esto le permite a la guía de movimiento lineal compensar errores en las superficies de montaje aun cuando la guía de movimiento lineal esté precargada. El movimiento lineal resultante es muy preciso y suave.</p>

EXCELENTE DURABILIDAD

Dada una precarga o cargas desparejas, las bolas no producirán ninguna diferencia en el desplazamiento, por lo que las bolas rodarán y circularán suavemente. Esto le brinda a la guía de movimiento lineal una excelente **resistencia al desgaste**, de esta manera se mantiene la **precisión durante un largo período**.

Para especificar los dispositivos de protección contra la contaminación para las aplicaciones deseadas utiliza el símbolo listado en la *Tabla 3.3*.

Tabla 1.3. Dispositivo de protección contra la contaminación

Dispositivos de protección contra la contaminación	Símbolo
Con sellos del extremo en los dos extremos	UU
Con sellos del extremo y laterales	SS

Las guías de movimiento lineal tipo HSR están equipadas con sellos de los extremos y sellos laterales como una característica estándar *Figura 3.6, 3.7*.

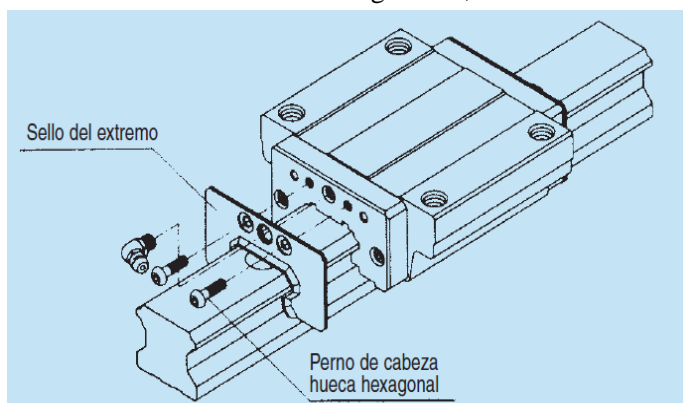


Figura 3.6. Sellos del extremo.

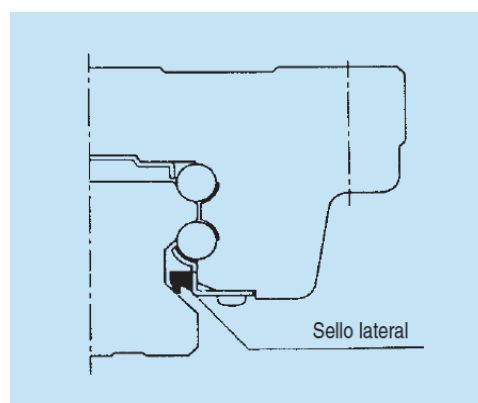


Figura 3.7 Sellos lateral.

Para que el montaje sea fácil y altamente preciso, las superficies de montaje deben tener los hombros apoyados contra lo que se presionan el riel de movimiento lineal y el bloque de movimiento lineal. *Ver la tabla 1.4* para saber la altura de los hombros de montaje. Para evitar interferencia de las esquinas del riel o bloque de movimiento lineal con los filetes de los hombros, los filetes del hombro deben tener un chaflán o un radio menor al especificado en la *tabla 3.4*.

Tabla 1.4 Altura de los hombros de montaje

Unidad: mm

Número de modelo	Radio del filete r (máximo)	Altura del hombro apropiado para el riel de movimiento lineal de H ₁	Altura del hombro apropiado para el bloque de movimiento lineal de H ₂	E
HSR 15	0.5	3	4	3.5

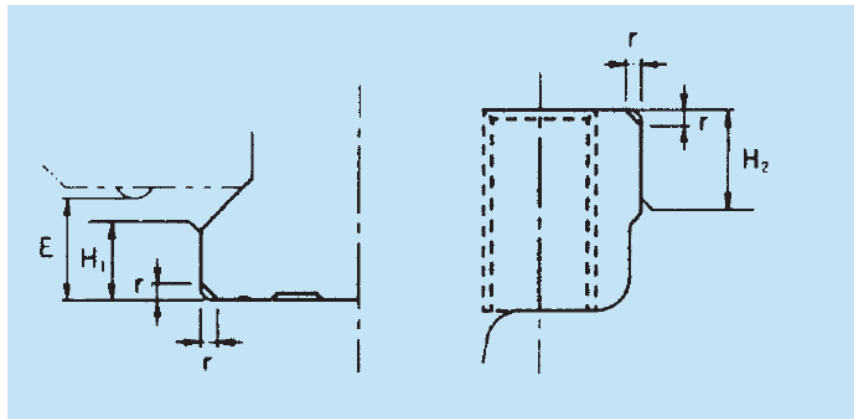


Figura 3.8 Hombro de montaje

3.4.3 Sistema de transmisión

El movimiento de cada articulación es dado por un motor de CD asociado a ella, el motor está en acoplada indirectamente. En la Figura 3.9 se muestra la fabricación de la base de apoyo de aluminio para el motor acoplado.



a)

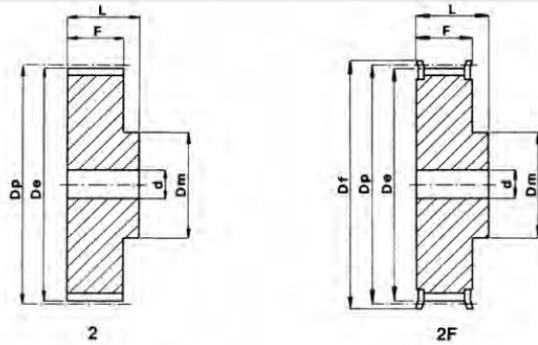


b)

Figura 3.9. a) Sistema de transmisión, b) Montado del motor.

La selección de las bandas y de poleas se realizó tomando en cuenta el par máximo entregado por los motores, así como los criterios propuestos por el fabricante de bandas y poleas. En la tabla 1.5 se muestra el cálculo para seleccionar las poleas y la selección de poleas], tanto para el motor y su respectiva banda, para este caso se eligió una polea con las características de la banda que se eligió, tomando en cuenta el paso. Las bandas seleccionadas de catálogo son las más próximas a las obtenidas en los cálculos. Para lograr el ajuste de las bandas los motores pueden moverse para ajustar la distancia entre centros.

Tabla 1.5 Poleas tipo XL



Tipo XL 037 Paso 1/5" (5,08mm)

Material	Código	Tipo	Dientes	Dp	De	Df	Dm	F	L	d	Kg
	14 XL 037	2F	14	22,64	23,13	28	16	14,3	20	-	0,02
	16 XL 037	2F	16	25,87	25,36	32	16	14,3	20	-	0,03

3.5 Fabricación de piezas

3.5.1 Estructura mecánica

El material utilizado es aleación de aluminio 6061, físicamente es un elemento muy abundante en la naturaleza, sólo aventajado por el oxígeno. Se trata de un metal ligero, con una densidad de 2700 kg/m³, y con un bajo punto de fusión (660 °C). Refleja bien la radiación electromagnética del espectro visible y el térmico. Es buen conductor eléctrico (entre 35 y 38 m/(Ω mm²)) y térmico (80 a 230 W/(m·K)), buenas propiedades mecánicas, además de la facilidad para obtenerlo. Algunas otras propiedades físicas importantes son:

- Módulo elástico: 6.9x10⁹ N/m²
- Módulo cortante: 27x10⁹ N/m²
- Límite elástico: 41.3613x10⁶ N/m²

En la Figura 3.10 se aprecia las piezas maquinadas para el montaje del robot, la configuración del robot es de tipo cartesiano, por lo que, se debe desplazar linealmente en el eje z.

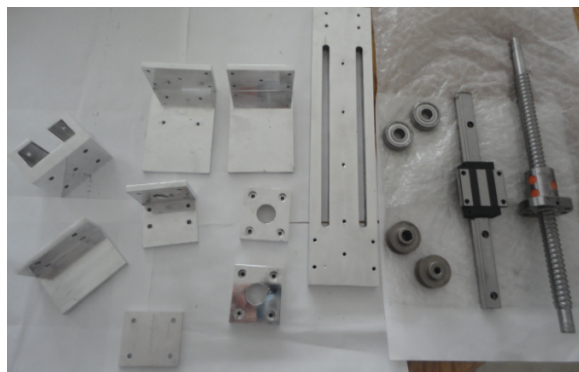


Figura 3.10 Piezas maquinadas para el montaje del robot.

3.5.2 Chumaceras

Las chumaceras tienen la función de girar el movimiento de una parte respecto de otra con la mínima fricción y máxima exactitud, las chumaceras diseñadas para este sistema son de material de aluminio. La chucera consta de dos placas de aluminio que en su interior tiene un balero de la marca SKF para poder darle movilidad al tornillo embalado, con la menor fricción en el sistema.

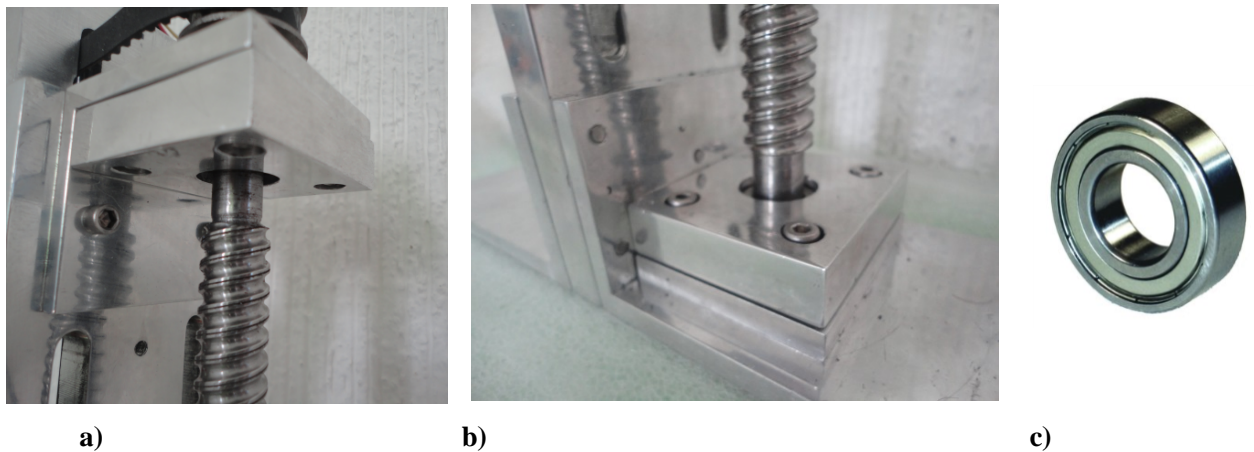


Figura 3.11. a) Chumacera superior y base, b) Chumacera inferior y base, c) balero o rodamiento

3.5.3 Tuerca husillo de apoyo

Una tuerca de apoyo es un elemento que une dos componentes mecánicos, permitiendo ser desmontado sin operaciones destructivas al sistema, la brida diseñada para acoplar el tornillo embalado y el riel de precisión está construida con material de aluminio, esto para evitar que el eje cargue masa extra y el desempeño del eje sea el correcto.

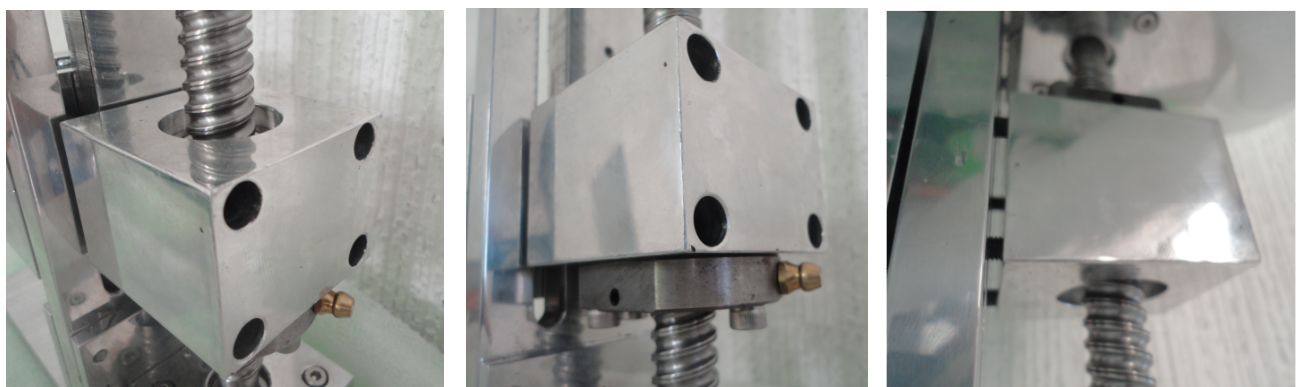


Figura 3.12 Tuerca de apoyo

3.5.4 Soporte tipo C

El bloque riel es acoplado a un soporte tipo C junto con la tuerca de apoyo para alinear el movimiento y reforzar la carga, de este modo se utilizará para montar el motor piezoeléctrico. Figura 3.13.

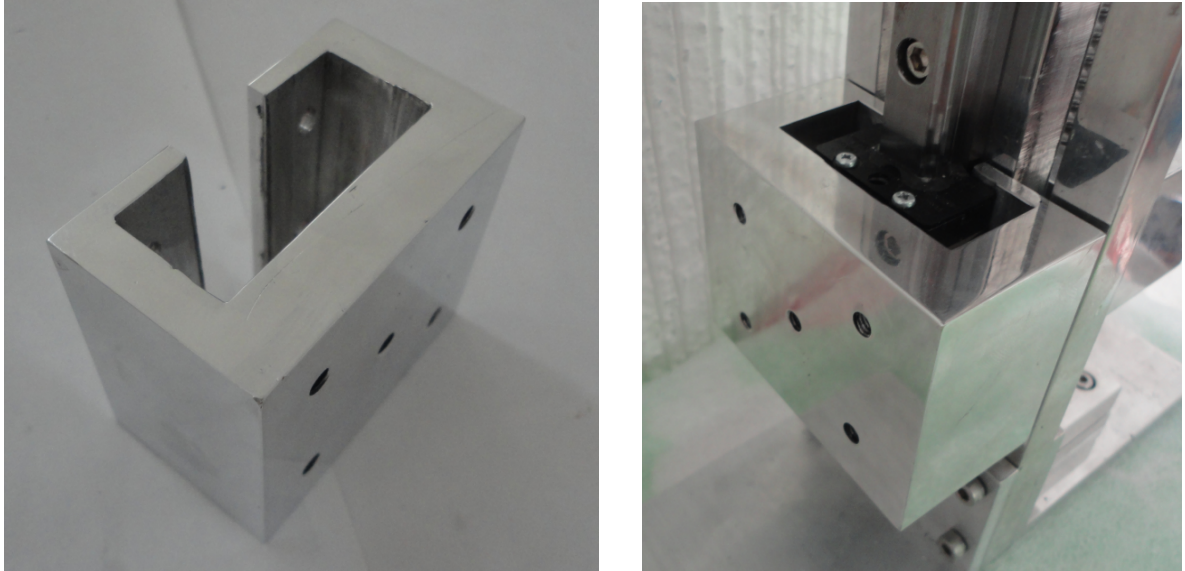


Figura 3.13. Soporte para montaje del motor piezoeléctrico

3.6 Resultados de diseño

Los robots son robustos ya que nos permite adaptarlo para distancias grandes, el objetivo principal del robot de un 1GDL para este experimento es posicionarlo a distintas distancias en vertical (eje Z0), la distancia máxima es de 200mm, el peso total de cada robots es de 3.1kg, también podemos adaptarlos horizontalmente, por lo que, sería posible medir en distancias grandes para otros experimentos. En la figura 3.14, se muestran los tres robots con la configuración cartesiana para 1GDL (eje Z0), para los ejes x , z1 se adaptaran motores piezoeléctricos de alta precisión.



Figura 3.14. Tres Robots cartesianos de 1GDL

3.7 Conclusiones

Para este capítulo se propone diseñar los posicionadores mecánico y obtener su modelo cinemático, dinámico de la configuración cartesiana del robot. Posteriormente se construye los posicionadores utilizando material de alta precisión. Por lo que se realizan las pruebas dinámicas del sistema como se propuso en el diseño, y se obtienen buenos resultados de movimiento. Se cumple un objetivo más en el modelado dinámico y diseño y construcción del robot posicionador.

CAPITULO 4

HARDWARE DEL SISTEMA

4.1 Control del sistema

En el diagrama a bloques de la Figura 4.1 se describe la conexión de las etapas requeridas para el sistema.

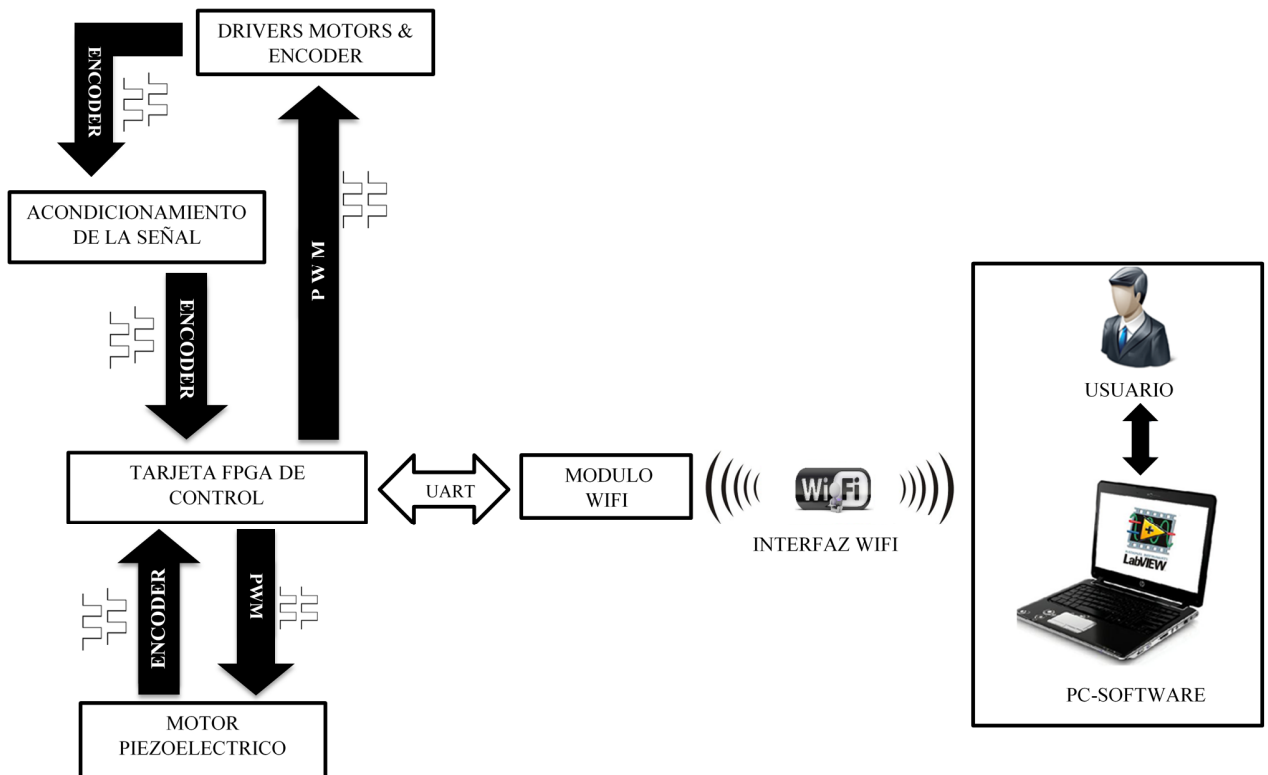


Figura 4.1. Bloques de implementación del hardware.

Cada motor cuenta con dos señales desfasadas de 90° que provienen de los encoders, posteriormente se filtran para su acondicionamiento, las cuales deben ser acopladas correctamente a la tarjeta FPGA diseñada previamente en la facultad de ciencias de la Electrónica (BUAP), es para poder enviar y recibir datos de la computadora al FPGA ya que cualquier pico de voltaje podría dañar el FPGA. Esta tarjeta FPGA a su vez está montada a otra tarjeta donde se encuentra toda la electrónica para el control, que hace el proceso de nuestras señales en los encoders de los motores, éstas señales son enviadas mediante la comunicación UART (*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*) con una interfaz WiFi a la computadora, una vez procesadas las señales con el ordenador, con la ayuda de una PC-Software (*LABVIEW*), se controlarán todas esas señales y se podrán visualizar en la pantalla del usuario para que este pueda darle órdenes a nuestros robots y así poder realizar el control del sistema.

4.2 Motor reductor 37DX57Lmm

La parte importante para el control del robot son los actuadores, en este caso nuestro sistema contara con tres motor reductores de C.D. para poder desplazar el eje z de cada robot cartesiano, en este caso la elección de nuestros motores fueron los motores 37DX57L de la marca Pololu que con sus características de operación nos brindará una respuesta ideal para nuestros sistemas, ver figura 4.2, cuenta con un encoder incremental con sus dos señales A y B desfasadas de 90°, y un par suficiente para mover el robot con buena resolución.



Figura 4.2. Motor 37DX57Lmm.

El motor reductor 37DX57Lmm es un potente motor de corriente continua de 12V con una caja de engranajes de metal 131.25: 1. Estas unidades tienen un eje de salida de 0,61 ", 6 mm de diámetro en forma de D. En la tabla 2.1 se muestra las características del motor.

Tabla 4.1. Especificaciones del motor	
Voltaje nomina:	12 V
Revoluciones:	80 RPM
Voltaje de consumo (sin carga):	300 mA
Torque del motor:	250 oz.-in (18 kg-cm)
Corriente máxima:	5A puesto.

4.3 Etapa de potencia

Para poder realizar el control del giro de nuestros motores se necesita realizar un circuito de potencia, el cual consistirá de un puente H con transistores de potencia, ésta a su vez controlará el giro y tendrá otra entrada que recibirá las señales PWM proveniente del FPGA, por otra parte, el puente H es crucial para caracterizar los motores y así encontrar la frecuencia ideal para un funcionamiento óptimo. Desde un principio se propone diseñar y fabricar un puente-H con altas prestaciones para el control de giro de los motores, dados que los drivers BTS7060B cumplen con las características óptimas se investigaron su funcionamiento y aplicación, para ello, comenzamos a implementar este driver. Los BTS7060B están basados de chip interno

con tecnología MOSFET, y es por eso que es fácil su implementación y montaje, en el mercado se encuentran fabricados estos tipos de puente-H con BTS7060B para su aplicación en los motores de giros, es fácil adquirir la fabricación de esta tarjeta (ver figura 4.3), solo es de verificar y dar la configuración correcta. Es importante conocer cada parte del circuito y sus características de operación para darle una correcta aplicación, en las siguientes secciones detallaremos las partes que las componen y sus conexiones.

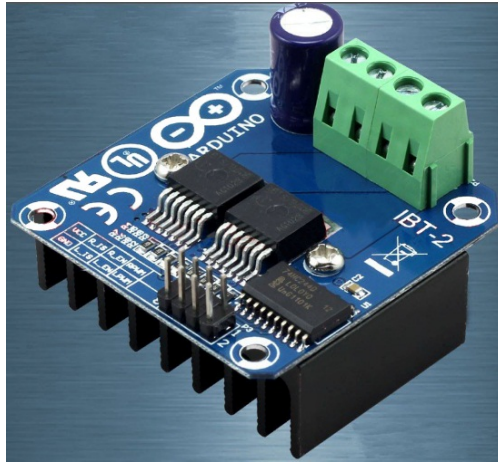


Figura 4.3. Puente H driver BTS 7960B.

Las características principales del puente-H driver BTS 7960B son:

- Voltaje de alimentación del motor: 6V-27V
- Corriente máxima: 43A
- Nivel de entrada de control (pin header) de potencia: 3.3V-5V
- Modo de control: dos frecuencias de entrada PWM hasta 25kHz
- Ciclo de trabajo: 0 a 100%.
- Corriente de salida acondicionado: sí
- Tamaño: 50mmx40mm / "X1.58" (pulgadas) 1.97 (aprox).

4.3.1 BTS7960B Driver

Este driver utiliza chips de Infineon BTS7960 ver Figura 4.4, contiene tres chips por separado en un solo paquete: Un MOSFET de canal-P Highside (HS) y un canal-N MOSFET Lowside (LS), junto con un controlador IC (TOP-CHIP), formando un medio-puente de alta corriente completamente integrado ver Figura 4.5. Todos los tres chips están montados sobre un leadframe común, usando el chip sobre el chip y el chip por Chip Technology. Los interruptores de alimentación utilizan tecnologías MOS verticales para asegurar una óptima sobre el estado de la resistencia. La interfaz con un microcontrolador es fácil de hacer por el controlador integrado IC que cuenta con entradas de nivel lógico, diagnóstico con la detección de corriente, ajuste de la

velocidad de respuesta (Slew-Rate), generación de tiempo muerto, y la protección contra exceso de temperatura, sobretensión, baja tensión, sobrecorriente y cortocircuito.

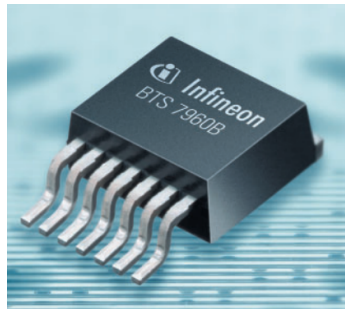


Figura 4.4. Chip driver BTS 7960B.

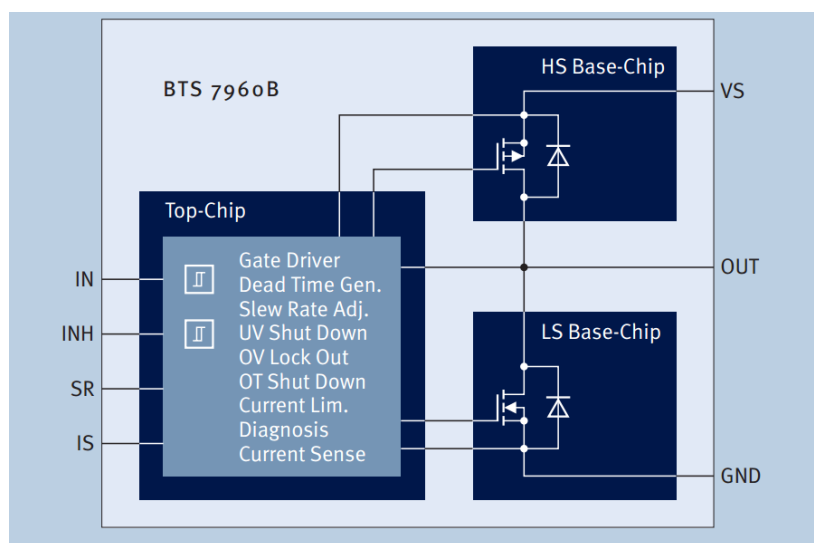


Figura 4.5. Chip interno del driver BTS 7960B.

Es parte de la familia NovalithICTM que contiene un canal-P MOSFET (High side-HS) figura 4.6, y un canal-N MOSFET de (Low side-LS) ver figura 4.7, es decir, los tiempos de conmutación nos da una respuesta óptima de operación;

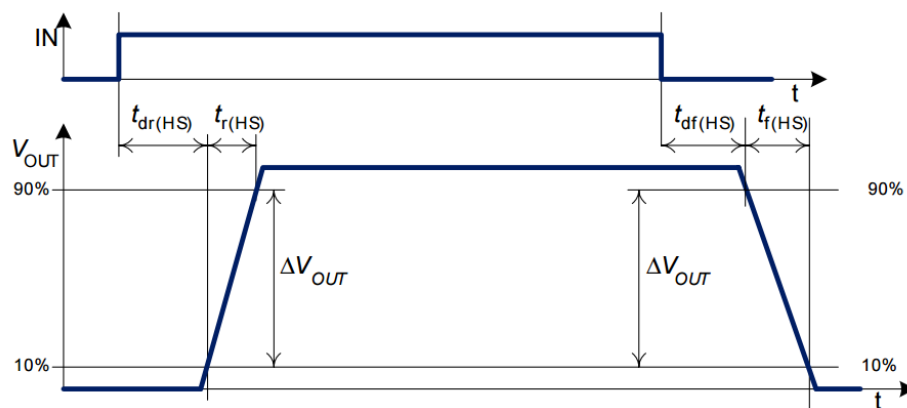


Figura 4.6. Canal-P MOSFET, definición de conmutación en alto (HS).

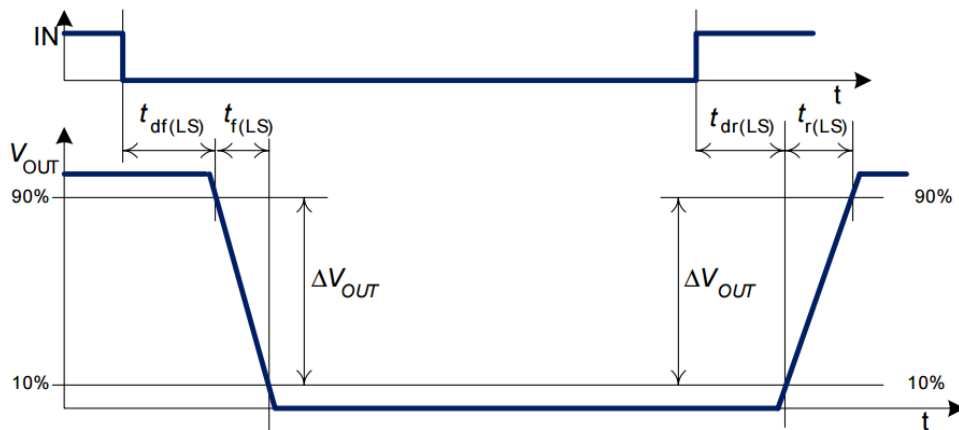


Figura 4.7. Canal-N MOSFET, definición de conmutación en bajo (LS).

Debido a las diferencias de tiempo para la salida y el flanco de bajada habrá un ligero diferencia entre la longitud del impulso de entrada y la longitud del impulso de salida. Se puede calcular utilizando las siguientes fórmulas:

$$\Delta t_{HS} = (t_{dr(HS)} + 0.5 t_{r(HS)}) - (t_{df(HS)} + 0.5 t_{f(HS)})$$

$$\Delta t_{LS} = (t_{df(LS)} + 0.5 t_{f(LS)}) - (t_{dr(LS)} + 0.5 t_{r(LS)}).$$

Donde:

$t_{r(HS)}$ = Tiempo de subida de HS.

$t_{dr(HS)}$ = Tiempo de retardo de encendido HS

$t_{f(HS)}$ = Tiempo de bajada de HS.

$t_{df(HS)}$ = Tiempo de retardo de apagado HS.

$t_{r(LS)}$ = Tiempo de subida de LS.

$t_{dr(LS)}$ = Tiempo de retardo de apagado LS

$t_{f(LS)}$ = Tiempo de bajada de LS.

$t_{df(LS)}$ = Tiempo de retardo de encendido LS

Internamente, el medio puente H se compone de un chip integrado y un paso de la regulación de corriente a través del circuito. El BTS7960 se puede combinar con otra BTS7960 para formar el puente-H para aplicaciones de accionamiento del motor y para configuraciones de impulso y frenado de tres fases, las entradas/salidas IS y SR se conecta directamente a la tierra, para que tengan el menor tiempo posible y más

corriente disponibles. Sus componentes y ensamblaje interno se pueden ver en la figura 4.8, y la relación de sus entradas y salidas en la tabla 4.2.

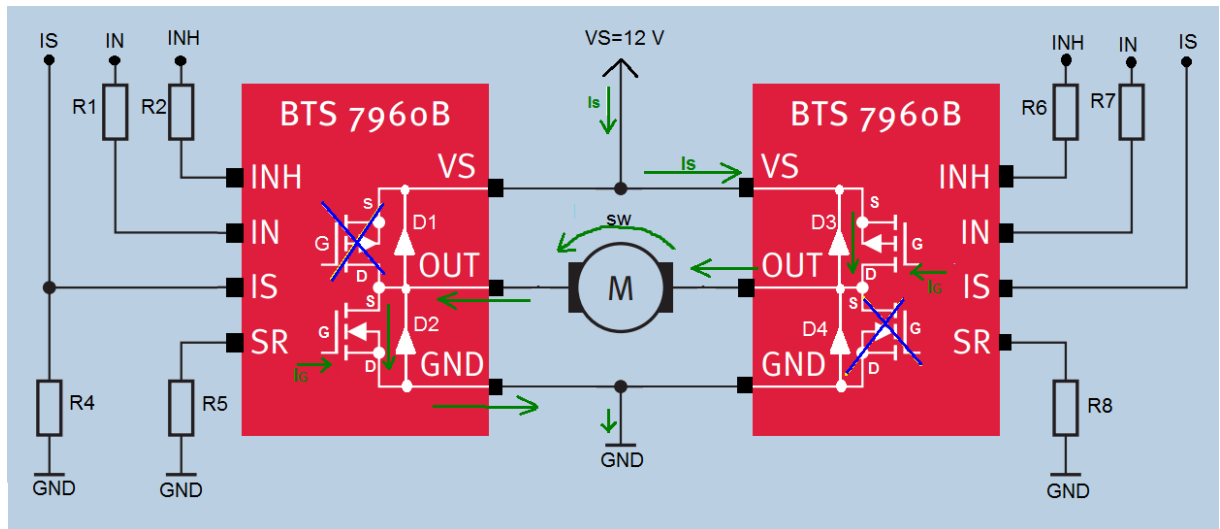


Figura 4.8. Puente-H con dos BTS7060B para ambos giros.

PIN	I/O	FUNCION
3	INH= Inhibit	Cuando están apagados, éste apaga el componente y lo coloca en modo de espera.
2	IN=Input	Entrada del circuito, define si el dispositivo está en HIGH o LOW, límites de (0V a 5.3V).
6	IS= Current Sense	Controla la corriente que fluye en el componente. Detección de corriente y Diagnóstico.
5	SR= Slew Rate	Control del tiempo de respuesta del componente, La velocidad de respuesta de los interruptores de alimentación se puede ajustar mediante la conexión de una resistencia entre SR y GND.
7	VS= Supply	Alimentación del circuito (5.5V a 25V).
4,8	OUT= Output	Salida de energía para el motor
1	GND= Groud	Tierra

Su funcionamiento se basa en un sistema de control HIGH y LOW (alto y bajo). En el controlador de potencia se utilizará segundo medio puente-H para lograr un control completo, cuando un medio de puente en H recibe una señal de 3.3V (ALTO) en la entrada (IN) el componente asume un estado en el que dos MOSFETs entren en contacto, lo que permite la corriente entre al VS y salir por OUT. Si usted no recibe ninguna señal (LOW) la corriente, entrará en el OUT y salida a través de la tierra (GND) del dispositivo. El control y la operación se detallan a continuación.

En la figura 4.9, el medio puente H está en el régimen alto a la derecha y la izquierda BAJA. Uno puede ver que la corriente fluye en la dirección VS / OUT en uno de ellos y hacia OUT / GND en el otro, haciendo que el motor gire a la izquierda, y los dos componentes sólo uno de los MOSFET está en off y el otro.

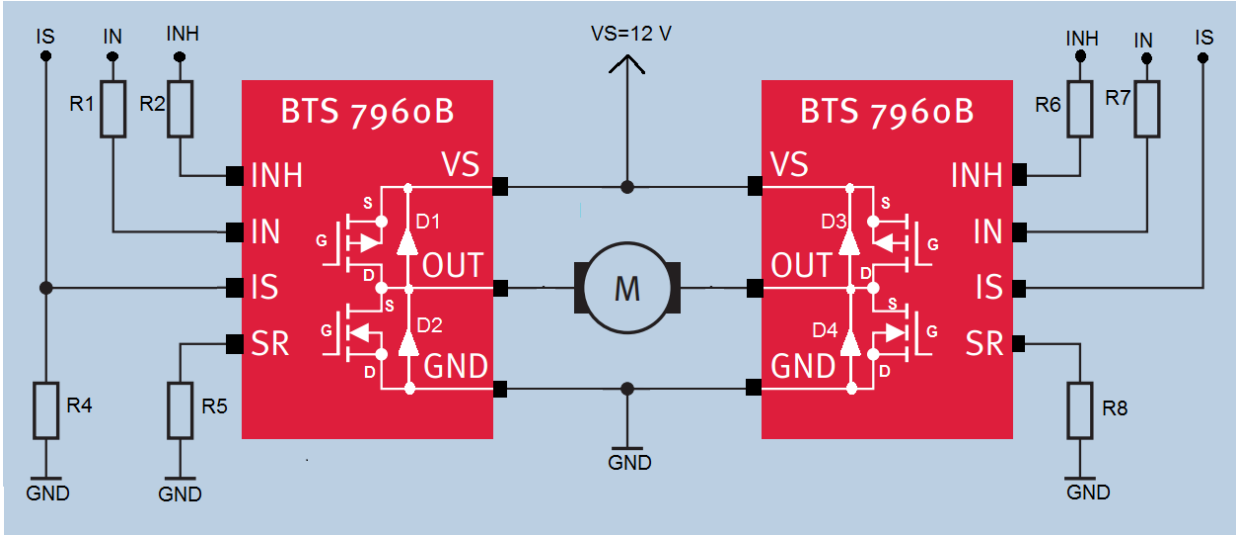


Figura 4.9. Función de giro a la izquierda Puente-H con dos BTS7060B.

En la figura 4.10, el medio puente H del esquema de la izquierda es de alta y baja de la derecha. Se puede observar que la corriente fluye en la dirección VS / OUT en una dirección y OUT / GND en el otro, haciendo que el motor gire a la derecha y, los componentes de nuevo, sólo uno de los MOSFETs están conectados.

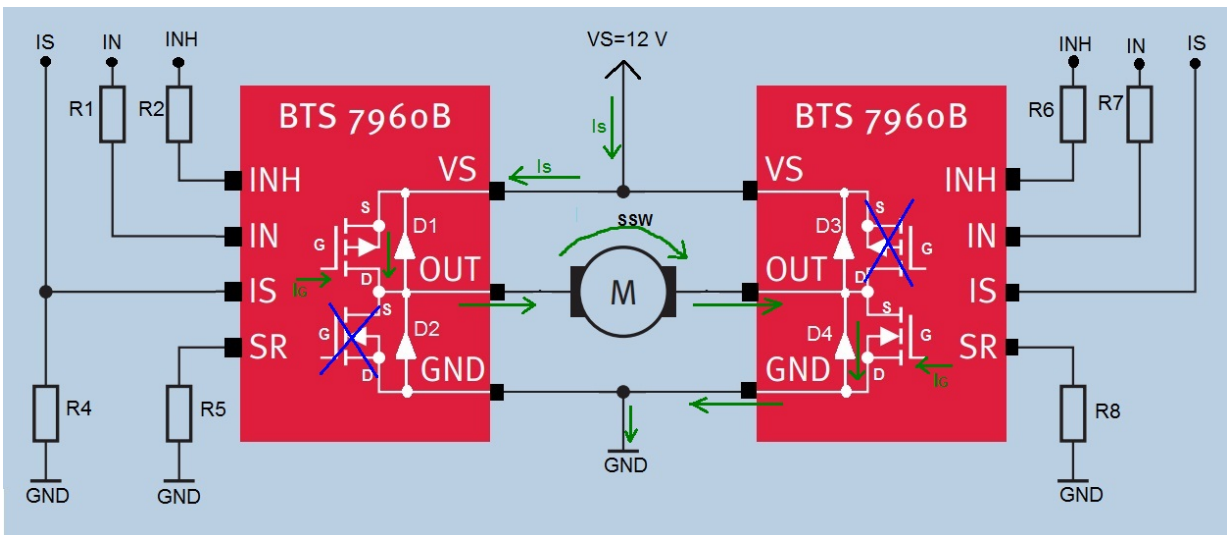


Figura 4.10. Función de giro a la derecha Puente-H con dos BTS7060B.

En cualquier caso, mediante el control PWM, que está conectado a la entrada de INH del componente, será a través de la misma salida FPGA en los dos medio puente en H, para funcionar en la misma longitud de onda y la frecuencia.

4.3.2 Buffer 74HC244D

El 74HC244D es un driver de 8 bits buffer/línea, con salidas 3-State. El dispositivo se puede utilizar como dos buffers 4 bits o una memoria intermedia de 8 bits. Las características del dispositivo de las dos habilitaciones de salida (1OE y 2OE), cada uno controla cuatro de las salidas de 3-state. Un HIGH sobre (nOE) hace las salidas asumir una alta impedancia OFF-State. Las entradas incluyen diodos de fijación que permiten el uso de resistencias limitadoras de corriente para interconectar entrada a tensiones superiores a Vcc, en la figura 4.11 muestra el diagrama internamente del circuito y en la tabla 4.3 se muestra su descripción.

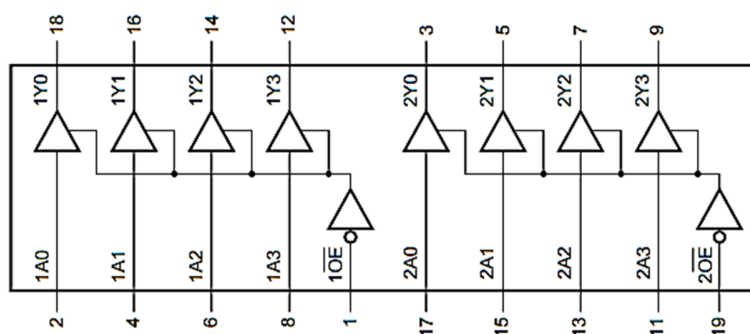


Figura 4.11. Diagrama 74HC244D.

Tabla 4.3

SIMBOLO	PIN	DESCRIPCION
$\overline{1OE}, \overline{2OE}$	1, 19	Salida/entrada de habilitación (LOW activo)
1A0, 1A1, 1A2, 1A3	2, 4, 6, 8	Dato de entrada
2Y0, 2Y1, 2Y2, 2Y3	3, 5, 7, 9	Bus de salida
GND	10	Conexion a Tierra (0 V)
2A0, 2A1, 2A2, 2A3	17, 15, 13, 11	Dato de entrada
1Y0, 1Y1, 1Y2, 1Y3	18, 16, 14, 12	Bus de salida
V _{CC}	20	Voltaje alimentacion (2 V - 6V)

Entradas		Salidas
\overline{nOE}	A	Y
Low	Low	Low
Low	High	High
High	X (No conectado)	Z (alta impedancia Off-State)

En un circuito de prueba mostrada por el fabricante se verifica la respuesta de forma de ondas cuando inyectamos un voltaje de entrada se obtienen señales como mostrado en la figura 4.12, 4.13, 4.14 y en la tabla 4.4 se muestra las características de la prueba.

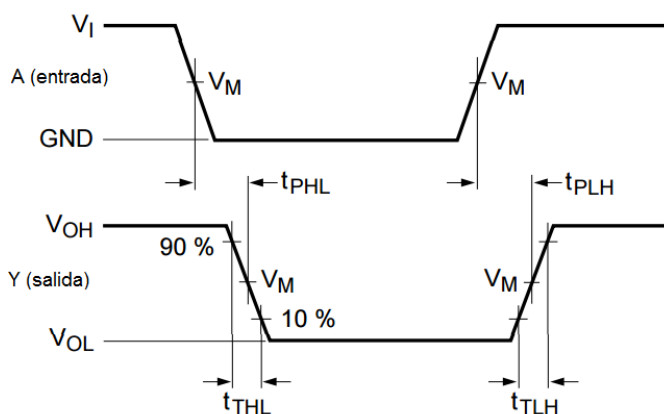


Figura 4.12. Entrada (A) a salida (Y) retardos de propagación y tiempo de transición de salida

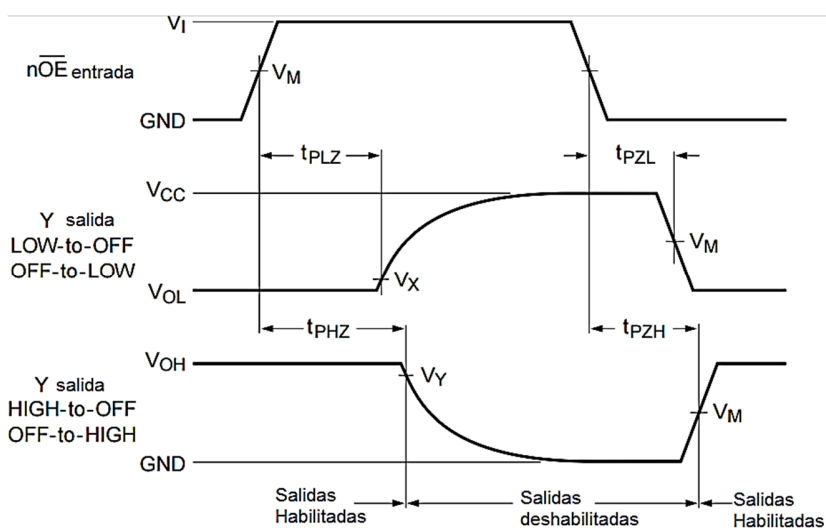


Figura 4.13. Activado y desactivado de los tiempos 3-Estados (\overline{nOE}).

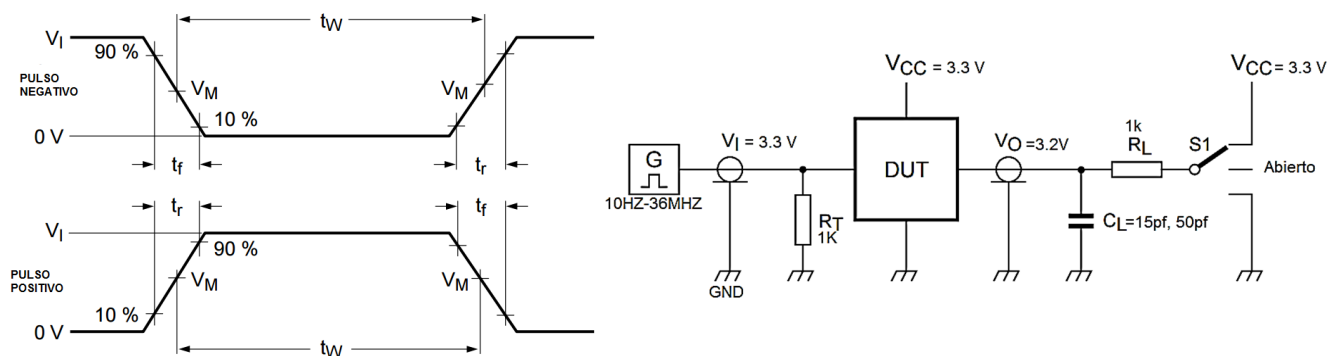


Figura 4.14. Circuito de prueba para la medición de los tiempos de conexión

Tabla 4.4.- Datos de la prueba

Tipo	Entradas		Salidas			S1 Posicion			
	V_M (offset)	V_I	t_r, t_f	V_M (offset)	V_X (offset)	V_Y (offset)	t_{PHL}, t_{PLH}	t_{PZH}, t_{PHZ}	t_{PZL}, t_{PLZ}
74HC244D	$0.5 \times V_{CC}$	V_{CC}	6ns	$0.5 \times V_{CC}$	$0.1 \times V_{CC}$	$0.9 \times V_{CC}$	Abierto	GND	V_{CC}

Definiciones del circuito de prueba de la figura 4.14;

R_T = Resistencia de terminación debe ser igual a Z_o impedancia de salida del generador de impulsos.

C_L = Capacitancia de carga incluyendo plantilla, y la capacitancia de la sonda.

R_L = Resistencia de carga.

S_1 = Interruptor de selección de prueba

4.3.3 Diagrama general del Puente H

Dadas sus características óptimas y descritas anteriormente, el diseño del circuito completo para el puente-H es fácil de conectar, en la figura 4.15 se muestra el diagrama esquemático general de diseño para ambos sentidos de giro de los motores. Dadas las características que debe cumplir para el diseño del puente H, Arduino fabrica las tarjetas utilizando los BTS7960B para la aplicación de los giros de motores figura 4.16, por lo tanto, cumple la mayor parte de las conexiones del diseño y tiene un funcionamiento óptimo.

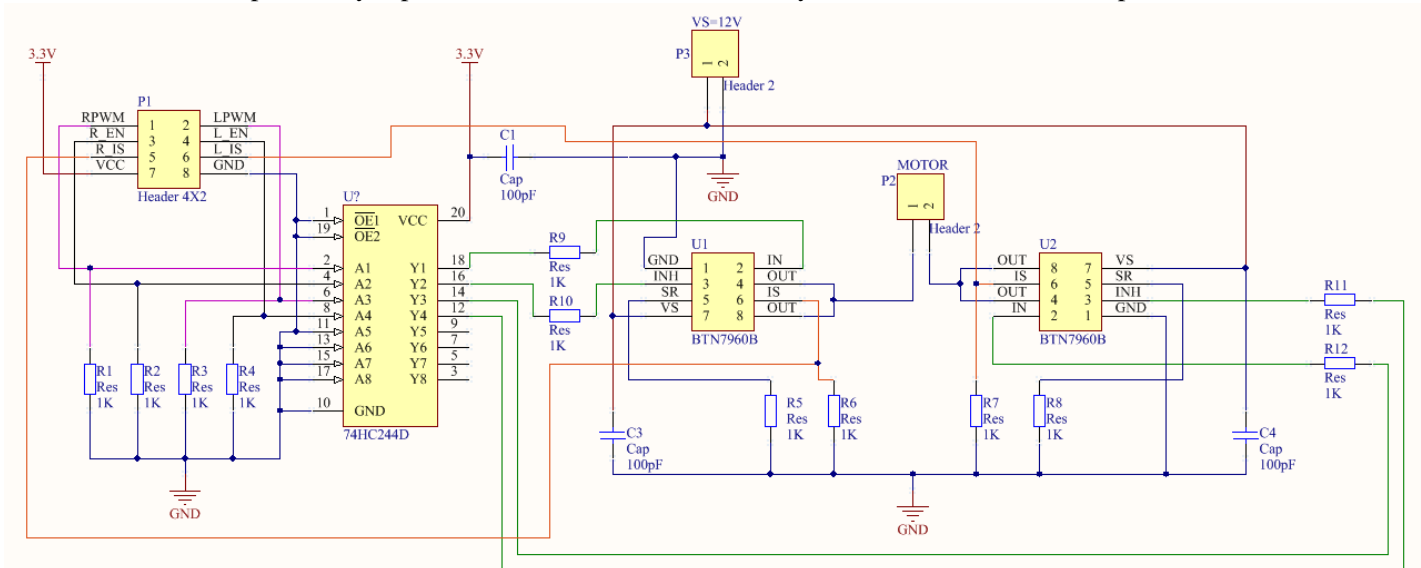
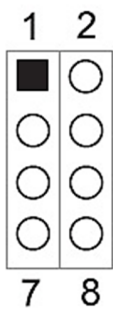


Figura 4.15. Diagrama esquemático del puente-H.



- 1.- RPWM; Avance de giro o entrada de la señal PWM activando en alto.
- 2.- LPWM; Inversión de giro o entrada de la señal PWM activando en alto.
- 3.- R_EN; Habilitando la entrada avanza el motor: HIGH habilitado, LOW inhabilitado.
- 4.- L_EN; Habilitando la entrada Invierte el giro del motor: HIGH habilitado, LOW inhabilitado.
- 5.- R_IS; Salida de alarma lateral de la corriente, Avance de giro.
- 6.- L_IS; Salida de alarma lateral de la corriente, Inversión de giro.
- 7.- VCC; Entrada de alimentación, suministrada por el FPGA +3.3V.
- 8.- GND; Señal común conectada al FPGA, terminal de tierra.

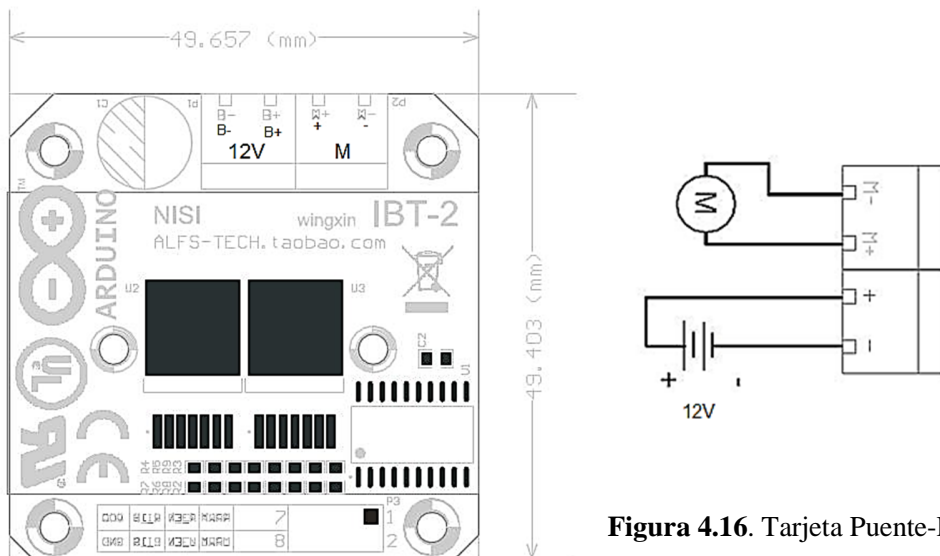


Figura 4.16. Tarjeta Puente-H vista superior

4.4 Caracterización del Motor reductor

La caracterización consiste en encontrar la frecuencia óptima con la que trabajara mejor el motor y posteriormente será parte importante para el control del motor y que vamos a crear como bloque en el firmware. Por lo que, detallaremos en las siguientes secciones paso a paso la metodología que se utilizó para llevar a cabo esta técnica. La función de la caracterización es que nos permite que nuestro motor de C.D. pueda ser modificado en base a su frecuencia de trabajo con el fin de que nuestro motor pueda trabajar como un motor de transmisión directa. No podemos modificar el voltaje, porque el voltaje que necesitamos es 12v, por lo tanto es constante y al ir modificando el voltaje empieza a trabajar a 3.5V, y el torque necesario para este no es suficiente en este voltaje, la corriente tampoco se puede modificar ya que la corriente solamente la consume, así que lo que debemos modificar es el ciclo de trabajo a través de una frecuencia optima del motor y que iremos modificando para obtener distintas fuerzas sin forzar la eficiencia del motor.

4.4.1 Torque

El par motor o torque es el momento de fuerza que ejerce un motor sobre el eje de transmisión de potencia. Si un cuerpo es capaz de rotar sobre un eje, el resultado de la fuerza es una combinación de la fuerza aplicada y la distancia al eje rotacional, como se puede observar en la figura 4.17. A este resultado se le conoce como par o torque *Ec. 4.1* y es el producto vectorial de multiplicar la fuerza (F) por la distancia perpendicular al eje de rotación (d), donde F y d son vectores. El torque este representado por la siguiente formula:

$$\vec{\tau} = \vec{F} \times \vec{d} \quad \text{Ec. 4.1}$$

donde:

τ = Torque sus unidades estas dadas por (kg-m)

F= es la fuerza que actua sobre algun punto del cuerpo rigido (Kg)

d= es el radio del eje del motor (m)

El torque es una magnitud vectorial, si α es el angulo entre r y F, su valor numerico, por definicion del producto vectorial, es [24]:

$$\vec{\tau} = \vec{d}(\vec{F} \text{sen } \alpha) \quad \text{Ec. 4.1}$$

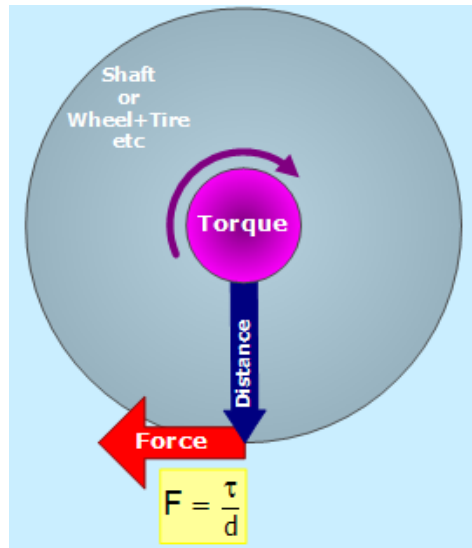


Figura 4.17 Representación gráfica del Torque o Par

4.4.2 Equipo para la caracterización

El motorreductor puede llegar hasta de 18kg de carga con el eje del motor, lo que al momento de caracterizar el motor puede haber variaciones debido a que el impacto es fuerte cuando se le aplica el voltaje nominal. Por lo que, se sugirió aumentar el radio del eje mediante una rondana de 3"φ y mediante un soporte sujetar el motor, *ver figura 4.18*, de esta manera se disminuye tres veces la capacidad de la fuerza.

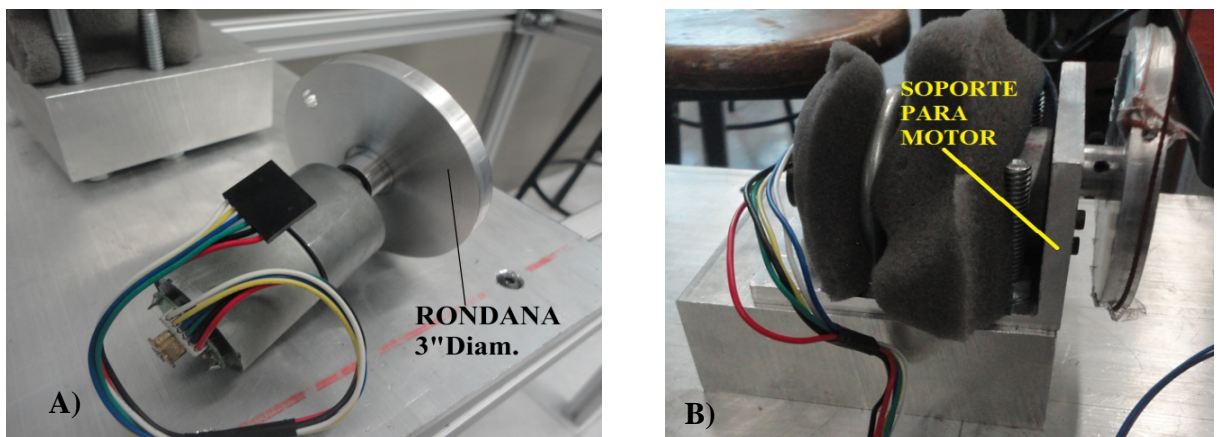


Figura 4.18. A) Rondana 3" diam. B) Montaje del motor

4.4.2.1 Torquimetro

Por otra parte, surgió la necesidad de diseñar y armar una estructura que nos permitiera facilitar el montaje y alineación de nuestros motores para nuestra caracterización, de esta manera se montó el Torquimetro, *figura 4.19*. Se adaptó también para realizar pruebas con motores de gran capacidad, para este trabajo solo se utilizan motores pequeños de 2N aproximadamente, como se explicó anteriormente se utilizó una rondana de $3''\phi$ para disminuir la fuerza y obtener resultados precisos.

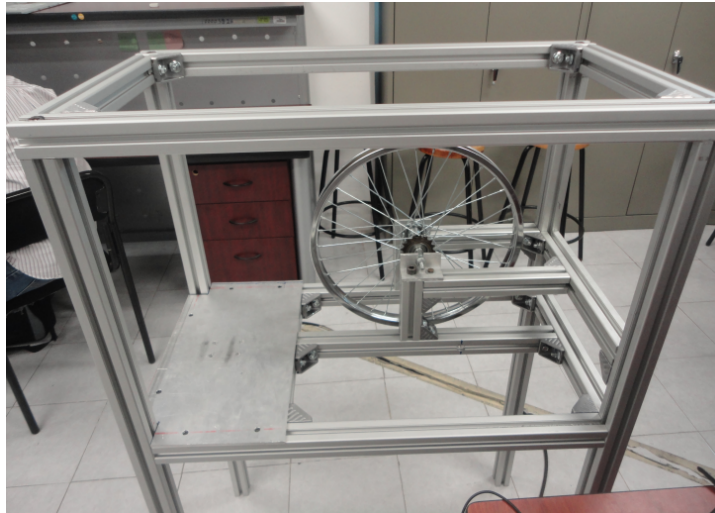


Figura 4.19. Torquimetro.

4.4.2.2 Montaje de caracterización

La caracterización consiste en someter a nuestro motor a frecuencia del rango de 50 Hz a 20 KHz, todas estas frecuencias están al 50% de su ciclo de trabajo. Para poder realizar el barrido de frecuencias necesitamos un circuito de potencia para inyectarle dichas frecuencias, para este caso utilizamos un puente H para su accionamiento y giros del motor (*figura 4.20*).

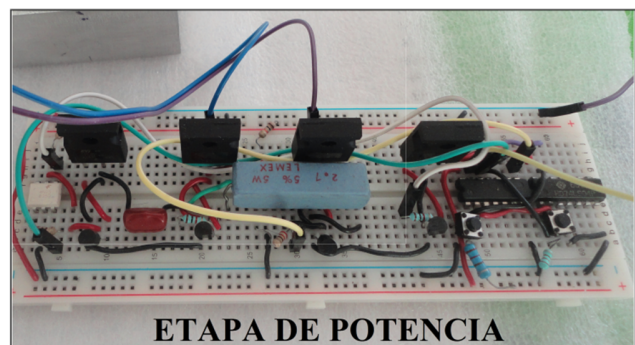
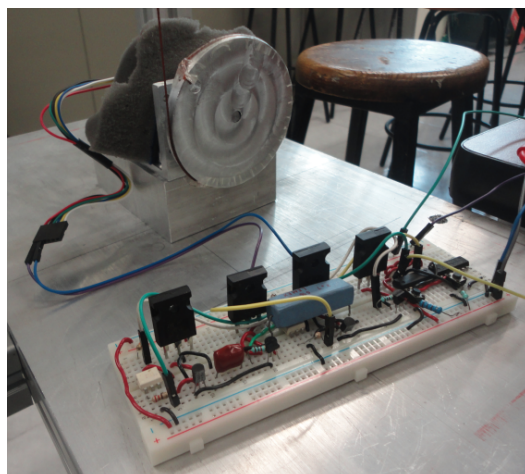


Figura 4.20. Puente H.

Posteriormente se monta en el torquimetro y todo el equipo de medición para su caracterización, configuramos el generador de frecuencias con un $V_{pp}= 3.3V$ y $offset=1.65$; la fuente de alimentación para 3.3V y 12V y un multímetro, y para poder obtener la fuerza con la que trabaja el motor, se utiliza un dinamómetro digital de 40kg, (figura 4.21).

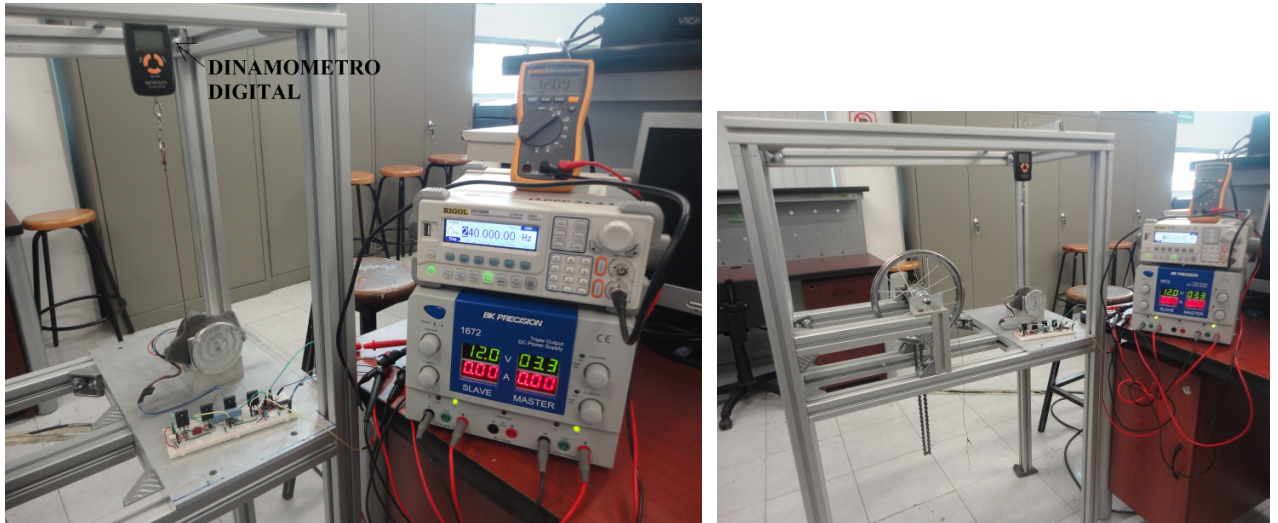


Figura 4.21. Caracterización de motor.

4.4.3 Metodología de caracterización

A continuación se detallan paso a paso la caracterización de los tres motorreductores y obtenemos diferentes resultados, debido a que cada motor trabaja mejor en distintas frecuencias, por eso, es necesario conocer en qué frecuencia es ideal para cada motor.

4.4.3.1 Motor 1

- $V_{pp}=3.3V$;
- Voltaje nominal= 12v;
- Offset=1.65V;
- Radio del eje =0.0381 mts.

Tabla 4.5 Eficiencia del motor_1		
Voltaje (V)	Corriente (A)	Torque n N-m.
3.5	0.45	0.449
4.0	0.70	0.587
4.5	0.77	0.699
5.0	0.92	0.759
5.5	1.16	0.934
6.0	1.24	1.050
6.5	1.31	1.196
7.0	1.40	1.346

7.5	1.52	1.383
8.0	1.72	1.514
8.5	1.97	1.701
9.0	1.99	1.757
9.5	2.07	1.794
10.0	2.32	1.869
10.5	2.34	1.981
11.0	2.36	2.093
11.5	2.48	2.130
12.0	2.49	2.172
12.5	2.45	2.299
13.0	2.46	2.392
13.5	2.45	2.467
14.0	2.46	2.474
14.5	2.60	2.542
15.0	2.56	2.654

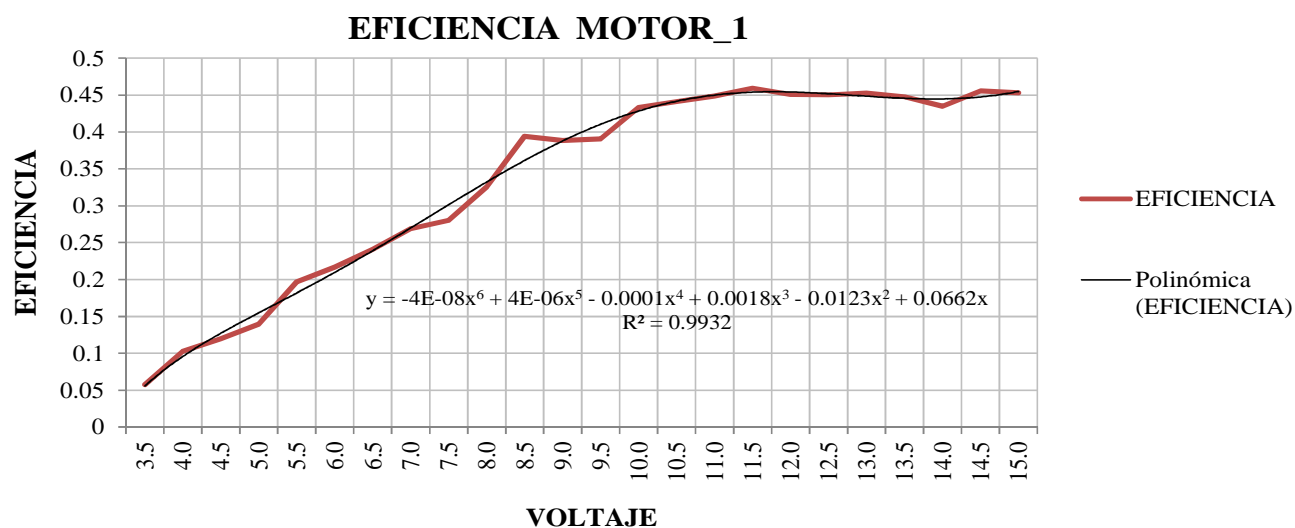
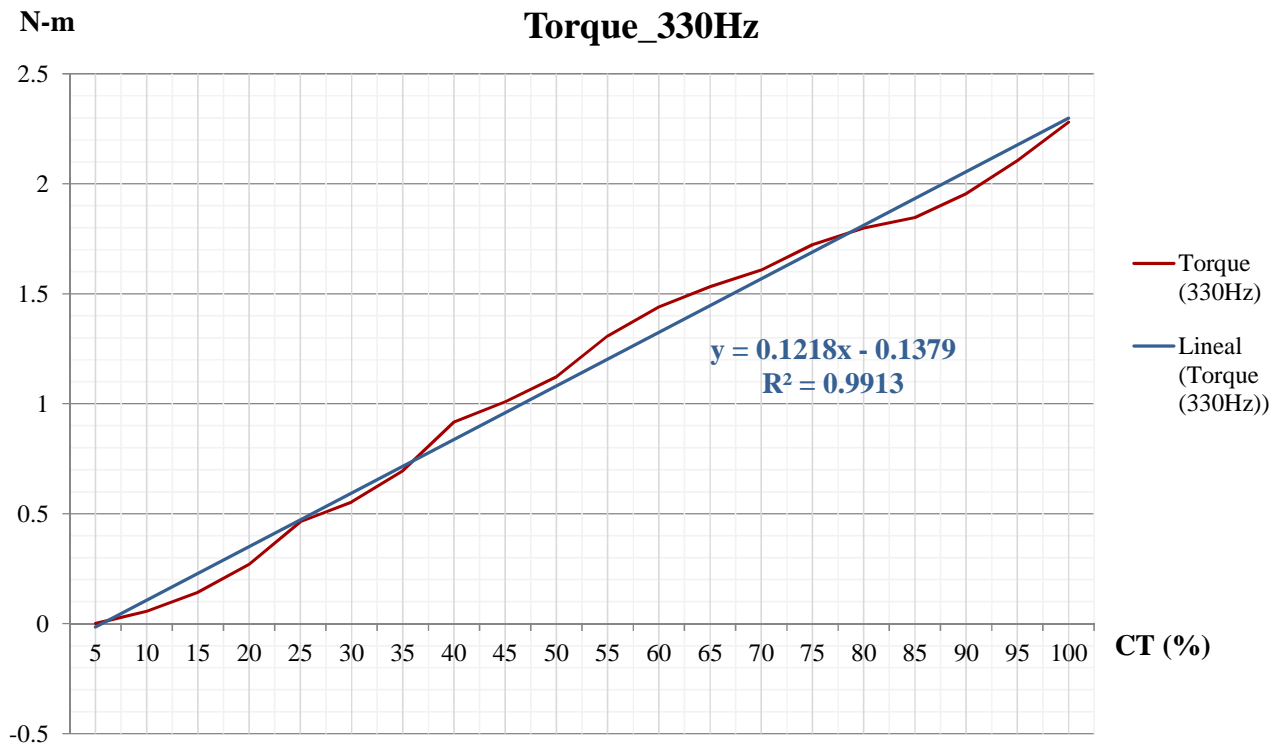
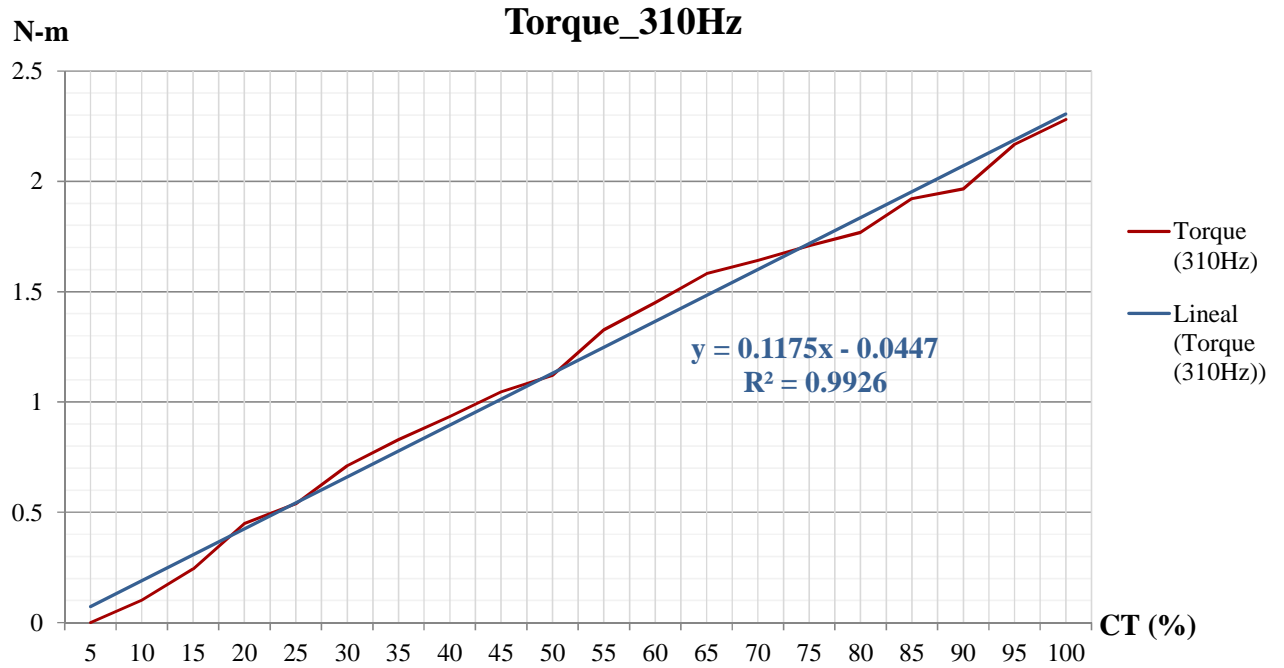


Figura 4.22. Eficiencia del motor_1.

En la tabla 4.5 se observa que en 12V del motor entrega un torque máximo al 100% de **2.172 N-m**, lo siguiente es dividirlo entre dos y obtenemos el torque al 50% que es igual a **1.082 N-m**, a partir de este dato, comenzamos a buscar las frecuencias ideales que se aproximen a ese torque al 50% del ciclo de trabajo (CT%).

Obtenidas las distintas frecuencias, observamos cuál es la mejor frecuencia de trabajo del motor. Las frecuencias cercanas del torque al 50% son: **310Hz, 330Hz, 350Hz, 9KHz**. Lo siguiente es realizar un barrido del ciclo de trabajo del 5% al 100% para las distintas frecuencias, nos detenemos a observar en las siguientes tablas si cumplen con la condición de ser lineal, de ser así, entonces podemos utilizarlas para el control. De las frecuencias mostradas anteriormente en las tablas, se observa que podemos trabajar en cualquiera de estas frecuencias ya que se aproxima ser lineal, pero para nuestro control se eligió utilizar la frecuencia de **350 Hz**, ya que es la menos audible y cumple con ser lineal. Una vez que se encontraron las frecuencias candidatas,

graficamos para visualizar la linealidad, tal vez no sea tan lineal las frecuencias encontradas por errores de medicion. Para encontrar la linealidad se aplica minimos cuadrados para corregir los errores, en la figura 4.23 se muestran las graficas de las frecuencias como tambien la ecuacion lineal.



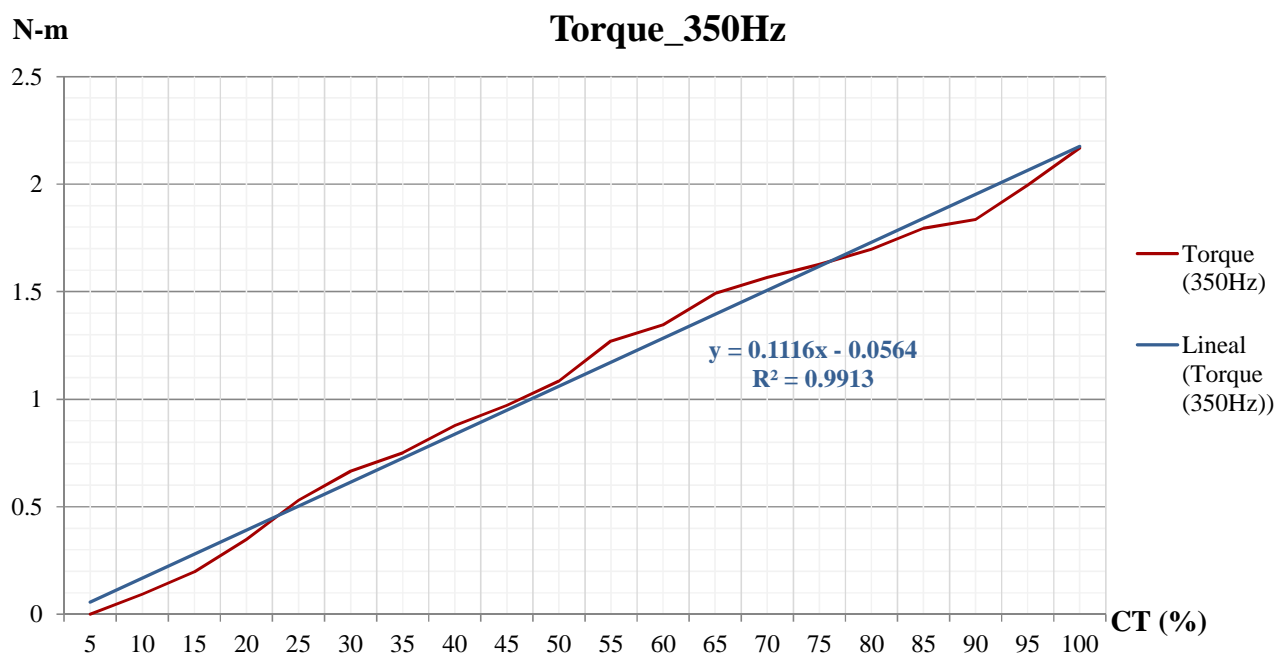


Figura 4.23 Linealidad del motor_1.

4.4.3.2 Motor 2

- Vpp=3.3V
- Voltaje nominal= 12v
- Offset=1.65V
- Radio del eje =0.0381 mts

Tabla 4.10 EFICIENCIA del motor_2		
Voltaje (V)	Corriente (A)	Torque N-m.
3.0	0.10	0.000
3.5	0.32	0.146
4.0	0.46	0.265
4.5	0.60	0.355
5.0	0.77	0.460
5.5	0.81	0.617
6.0	0.97	0.721
6.5	1.06	0.744
7.0	1.21	0.942
7.5	1.37	1.084
8.0	1.42	1.233
8.5	1.63	1.327
9.0	1.76	1.495
9.5	2.00	1.555
10.0	2.05	1.682
10.5	2.23	1.779
11.0	2.35	1.906

11.5	2.45	2.000
12.0	2.55	2.130
12.5	2.83	2.168
13.0	2.94	2.112
13.5	3.13	2.299
14.0	3.13	2.388
14.5	3.35	2.414
15.0	3.60	2.542

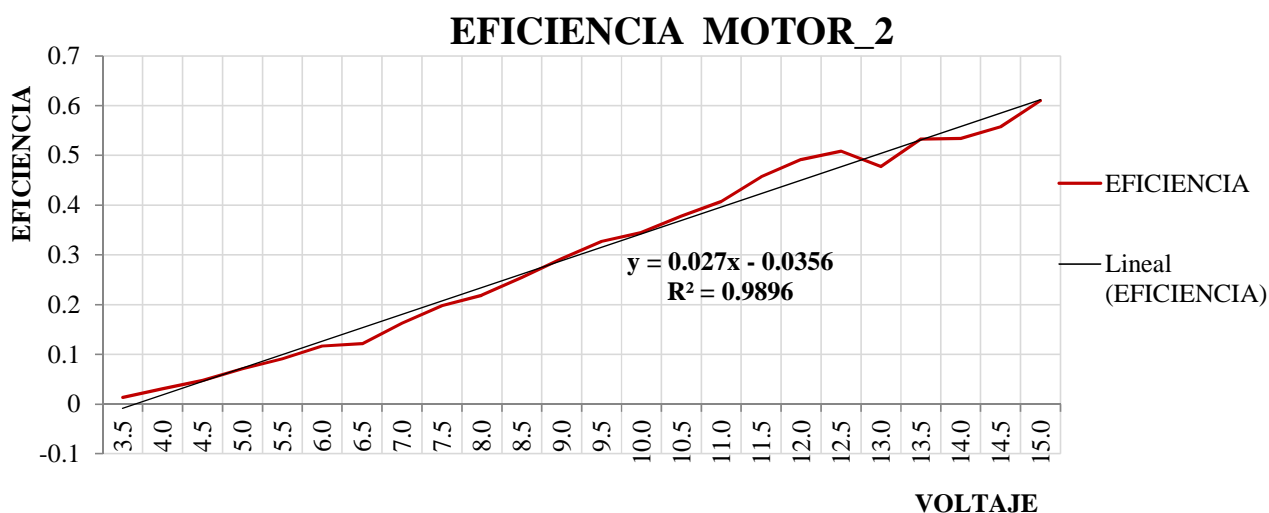


Figura 4.24. Eficiencia del motor_2.

En la tabla 4.10 muestra que en 12V del motor entrega un torque máximo al 100% de **2.130 N-m**, lo siguiente es dividirlo entre dos y obtenemos el torque al 50% que es igual a **1.065 N-m**, a partir de este dato, comenzamos a buscar las frecuencias ideales que se aproximen a ese torque al 50% del ciclo de trabajo (CT%).

Obtenidas las distintas frecuencias, observamos cuál es la mejor frecuencia de trabajo del motor. Las frecuencias cercanas del torque al 50% son: **330Hz, 370Hz**. Lo siguiente es realizar un barrido del ciclo de trabajo del 5% al 100% para las distintas frecuencias, nos detenemos a observar en las siguientes tablas si cumplen con la condición de ser lineal, de ser así, entonces podemos utilizarlas para el control. De las frecuencias mostradas anteriormente en las tablas, se observa que podemos trabajar en cualquiera de estas frecuencias ya que se aproxima ser lineal, pero para nuestro control se eligió utilizar la frecuencia de **330 Hz**, ya que es la menos audible y cumple con ser lineal.

Una vez que se encontraron las frecuencias candidatas, graficamos para visualizar la linealidad, tal vez no sea tan lineal las frecuencias encontradas por errores de medición. Para encontrar la linealidad se aplica mínimos cuadrados para corregir los errores, en la figura 4.25 se muestran las graficas de las frecuencias como también la ecuación lineal.

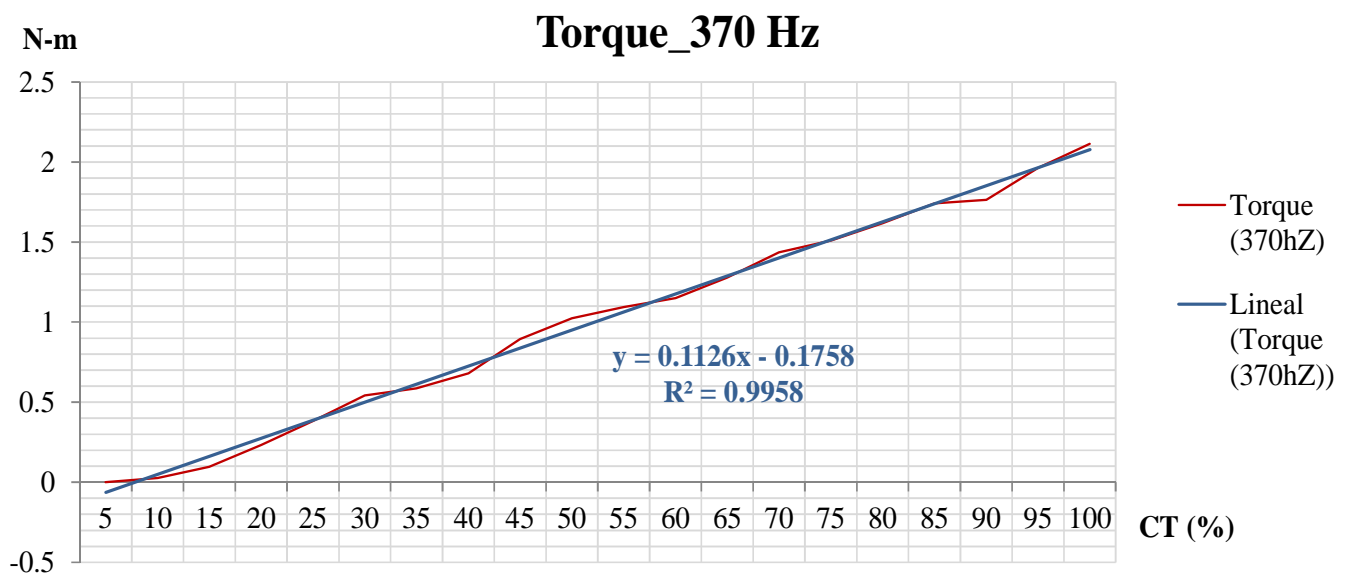
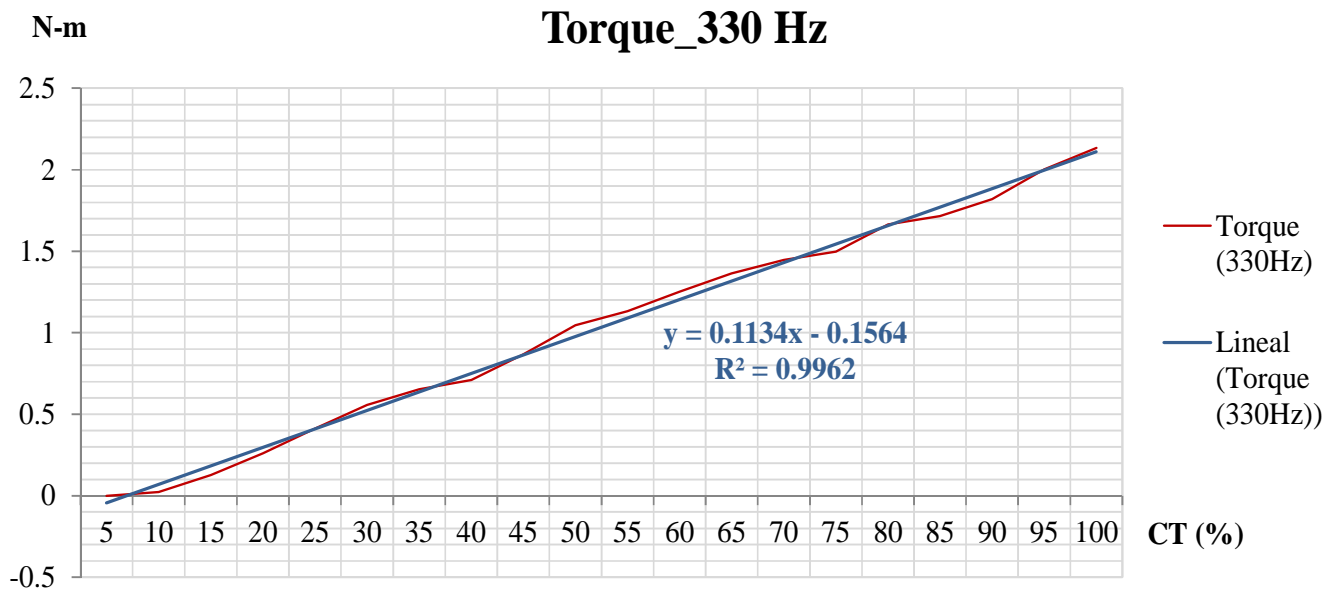


Figura 4.25 Linealidad torque del motor_2.

4.4.3.3 Motor 3

- Vpp=3.3V
- Voltaje nominal= 12v
- Offset=1.65V
- Radio del eje =0.0381 mts

Tabla 4.14 Eficiencia del motor_3		
Voltaje (V)	Corriente (A)	Torque N-m.
3.0	0.10	0.234

3.5	0.20	0.234
4.0	0.43	0.392
4.5	0.58	0.486
5.0	0.73	0.542
5.5	0.82	0.699
6.0	1.02	0.800
6.5	1.10	0.934
7.0	1.23	1.121
7.5	1.30	1.196
8.0	1.60	1.346
8.5	1.56	1.458
9.0	1.80	1.570
9.5	2.02	1.682
10.0	2.08	1.794
10.5	2.27	1.906
11.0	2.38	2.018
11.5	2.52	2.130
12.0	2.63	2.187
12.5	2.83	2.280
13.0	2.96	2.504
13.5	3.13	2.579
14.0	3.20	2.635
14.5	3.25	2.654
15.0	3.34	2.672

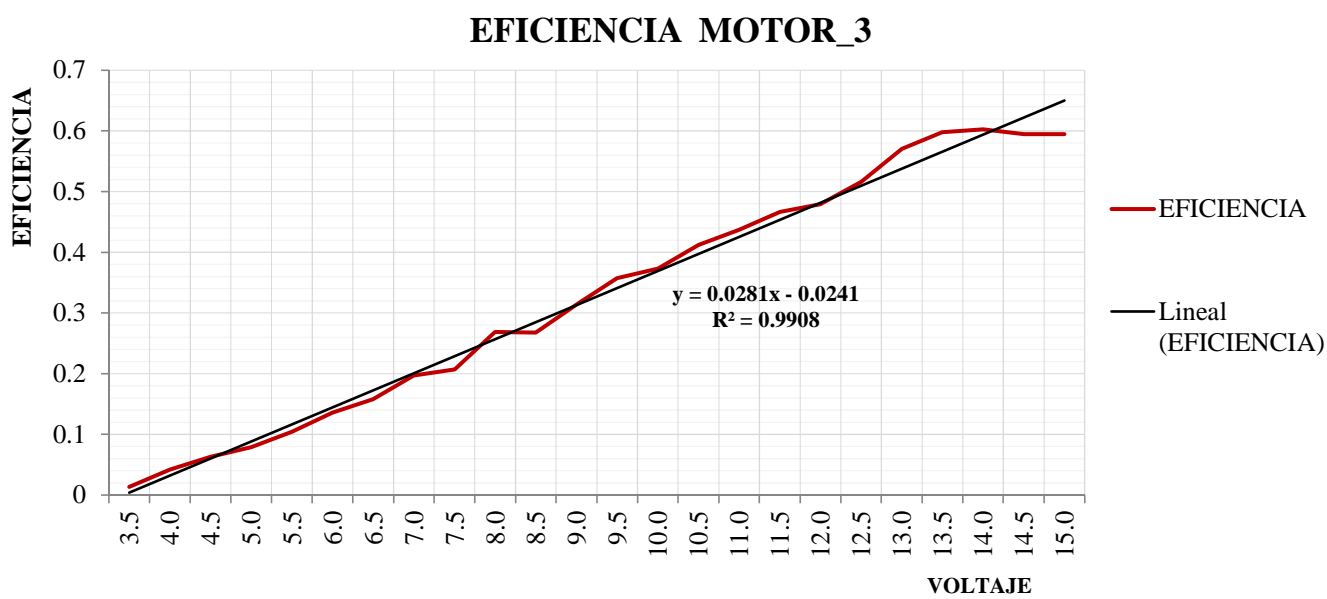


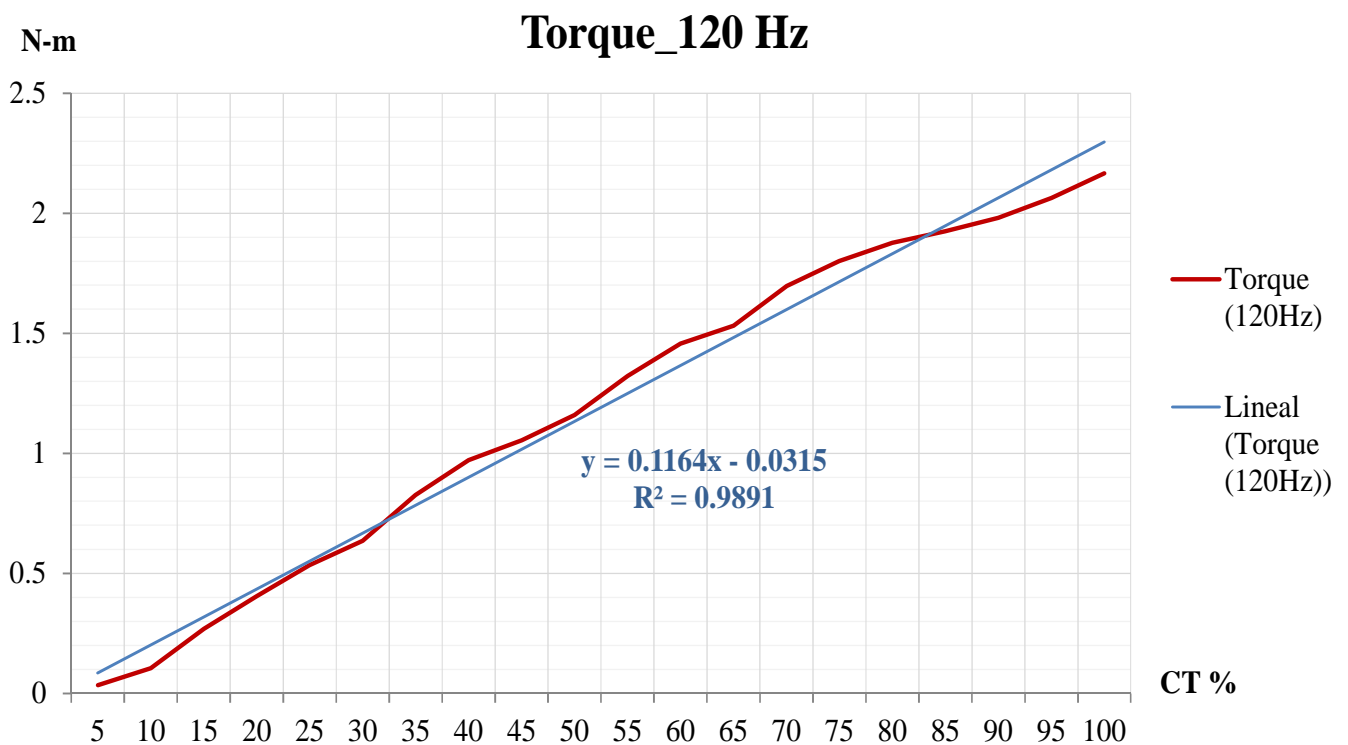
Figura 4.26. Eficiencia del motor_3.

En la tabla 4.14 muestra que en 12V del motor entrega un torque máximo al 100% de **2.182 N-m**, lo siguiente es dividirlo entre dos y obtenemos el torque al 50% que es igual a **1.091 N-m**, a partir de este dato, comenzamos a buscar las frecuencias ideales que se aproximen a ese torque al 50% del ciclo de trabajo (CT%).

Obtenidas las distintas frecuencias, observamos cuál es la mejor frecuencia de trabajo del motor. Las frecuencias cercanas del torque al 50% son: **120Hz, 240Hz**. Lo siguiente es realizar un barrido del ciclo de trabajo del 5% al 100% para las distintas frecuencias, nos detenemos a observar en las siguientes tablas si cumplen con la condición de ser lineal, de ser así, entonces podemos utilizarlas para el control.

De las frecuencias mostradas anteriormente en las tablas, se observa que podemos trabajar en cualquiera de estas frecuencias ya que se aproxima ser lineal, pero para nuestro control se eligió utilizar la frecuencia de **240 Hz**, ya que es la menos audible y cumple con ser lineal.

Una vez que se encontraron las frecuencias candidatas, graficamos para visualizar la linealidad, tal vez no sea tan lineal las frecuencias encontradas por errores de medición. Para encontrar la linealidad se aplica mínimos cuadrados para corregir los errores, en la figura 4.26 se muestran las graficas de las frecuencias como también la ecuación lineal.



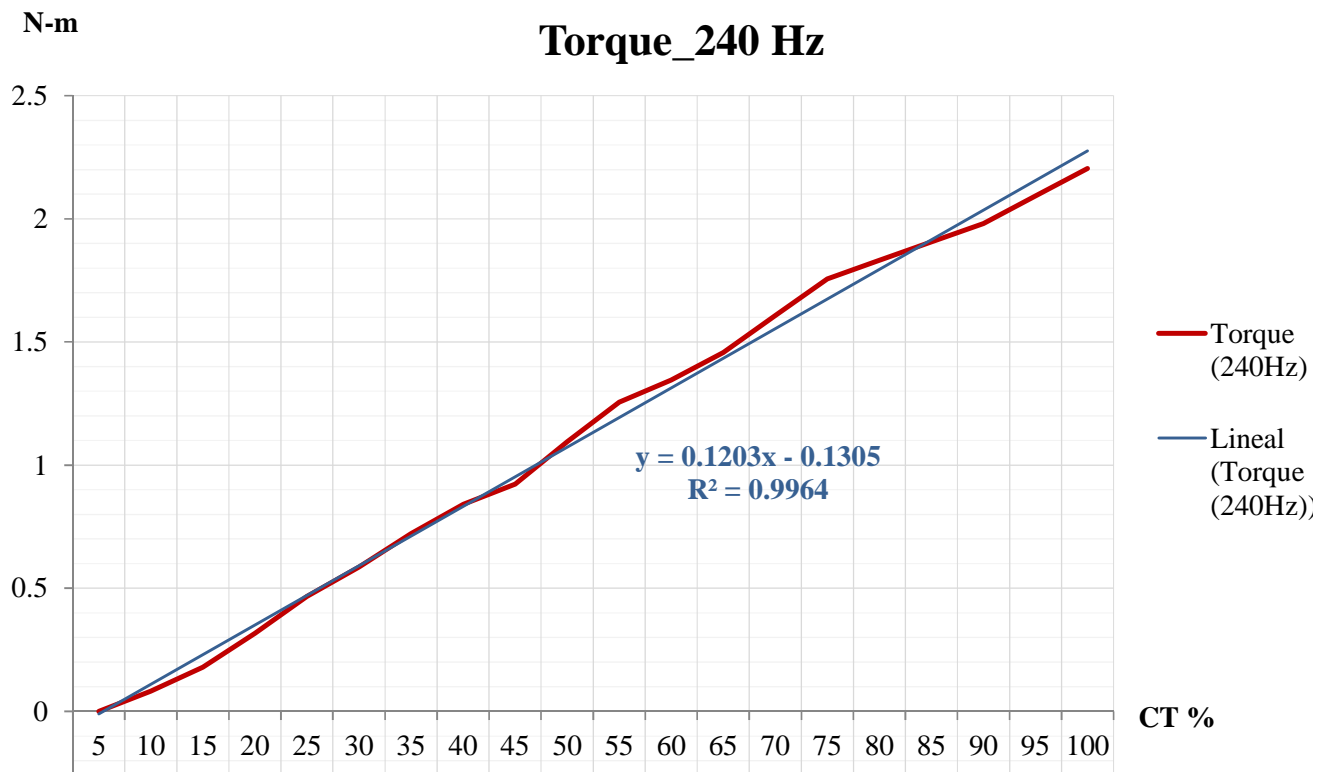


Figura 4.26 Linealidad torque del motor_3.

4.5 Encoder incremental

Estos encoders son ideales porque determina su posición, hace el conteo de impulsos cuando un rayo de luz es atravesado por marcas opacas en la superficie de un disco unido al eje. Los sensores Hall al ser magnéticos pueden trabajar en entornos extremos (temperatura) y polvorientos, no hará falta mantenimiento de limpieza, son muy estables y resistentes a la tensión mecánica, se utilizan sobre todo en aplicaciones donde el campo magnético varía con rapidez y el valor residual del terreno es bajo.

Las señales de salida de un encoder pueden ser un tren de pulsos, en forma de señal cuadrada, donde el número de impulsos que genera en una vuelta coincidirá con el número de impulsos del disco en el interior del encoder, nos referimos a encoders de un solo canal (señal A). Una segunda señal B suministra un tren de pulsos idénticos al que suministra la señal A pero desfasada 90° respecto de esta, es un encoder de dos canales.

4.5.1 Encoder del motor

Cuenta con un codificador en cuadratura integrada que proporciona una resolución de 64 conteos por revolución (CPR) del eje del motor cuando contando ambos bordes de ambos canales, Para calcular los conteos por revolución de la salida de la caja de cambios, multiplicar la relación de transmisión por 64 que corresponde a 8,400 conteos por revolución del eje de salida de la caja de cambios.

Los encoders son sensores que generan señales digitales en respuesta al movimiento. Están disponibles en dos tipos, uno que responde a la rotación y otro que responde al movimiento lineal. Cuando son usados en conjunto con dispositivos mecánicos tales como engranes, ruedas de medición o flechas de motores, estos pueden ser utilizados para medir movimiento lineal, velocidad o posición, en nuestro caso utilizaremos encoders del tipo incremental.

El sensor Hall requiere una tensión de entrada Vcc, entre 3,5 y 20 V y dibuja un máximo de 10 mA. Las salidas A y B son ondas cuadradas de 0 V a Vcc aproximadamente 90 ° fuera de fase, en la *tabla 4.17* detalla sus características. La frecuencia de las transiciones le indica la velocidad del motor, y el orden de las transiciones le indica la dirección. La siguiente captura de osciloscopio de la *figura 4.28* el fabricante muestra las salidas A y B del encoder (amarillo y blanco) con un voltaje del motor de 12 V y un sensor Hall 5Vcc:

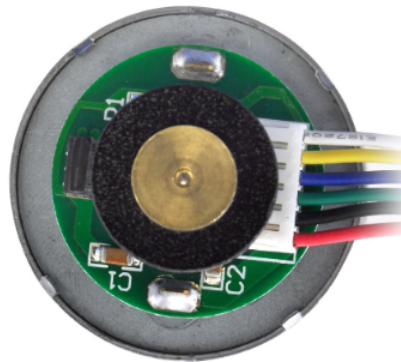


Figura 4.27. Encoder 64 CPR

Tabla 4.17. Conexiones del motor & encoder	
COLOR	FUNCION
Rojo	Potencia del motor (se conecta a una terminal de motor)
Negro	Potencia del motor (se conecta a la otra terminal del motor)
Verde	GND Encoder
Azul	Encoder Vcc (3,5 a 20 V)
Amarillo	Encoder A (salida)
Blanco	Encoder B (Salida)



Figura 4.28. Encoder A y B con 64 RCP (motor funcionando a 12 V y 5V encoder).

Contando los flancos (de bajada y subida) de ambas salidas se puede obtener 64 conteos por cada revolución del motor. Si se requiriera menos precisión en el sistema se podría solamente contar uno de los dos flancos y obtener una salida de 16 conteos por revolución.

Por otra parte, se deben comprobar físicamente, ya que cada motor tiene características diferentes de operación en las señales. Conectamos sin ninguna fuerza aplicada el motor a un driver eficiente y alimentamos con 12Vcc la salida (ver figura 4.29).

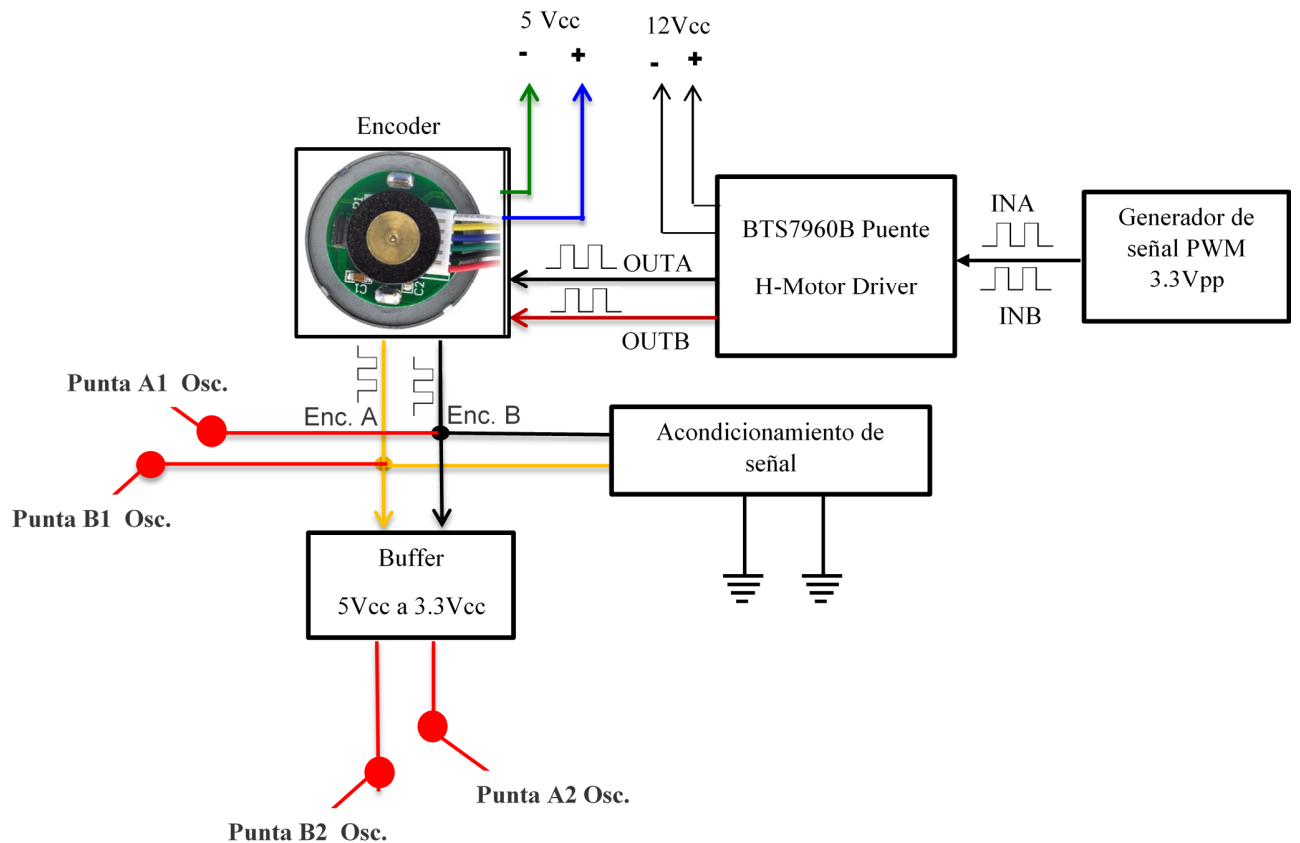


Figura 4.29. Esquema a bloques de las pruebas de Encoders

El objetivo es observar el comportamiento de las señales del encoder, para ello, alimentamos con 5 Vcc el sensor Hall, y de una forma sencilla es conectar un par de capacitores de 650pf a las terminales de las señales del encoder en paralelo a tierra del sistema para acondicionar las señales obtenidas evitando tener ruido y picos de voltaje. Generamos una señal PWM a la entrada con las frecuencias de cada motor caracterizado (330hz, 350Hz, 240Hz) a la entrada del driver con un ciclo de trabajo al 50% y un offset de 1.65Vpp. Se colocan las puntas A1 y B1 del osciloscopio como se muestra en la *figura 4.29* y se observan limpias las señales cuadradas de 5Vpp y la frecuencia constantes generadas por el encoder (*Ver figura 4.30*).

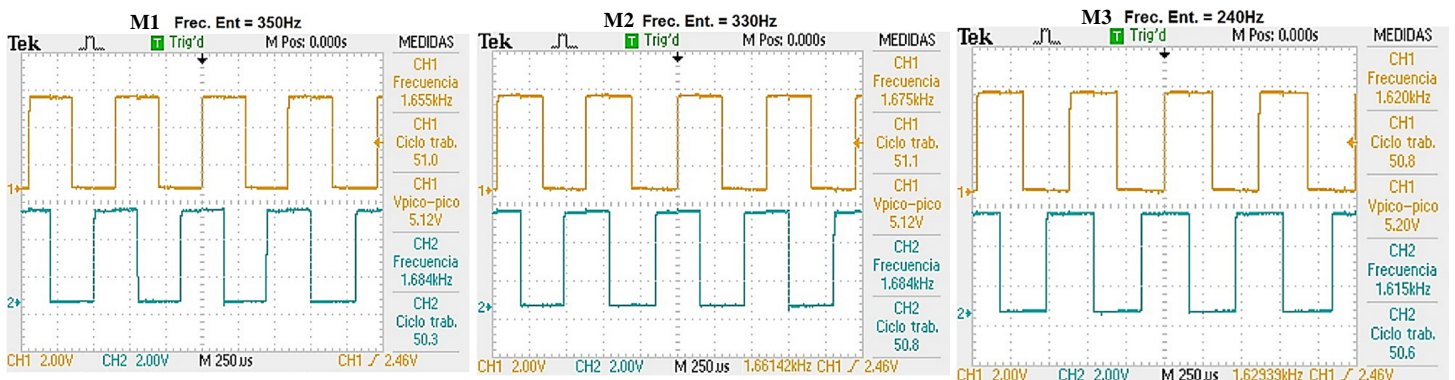


Figura 4.30. Onda Cuadrada 5Vpp señales del sensor Hall

Por otra parte, los FPGA recibe señales de entrada de 3.3 Vcc para la retroalimentación de las señales que provienen de los encoders, para ello, se conecta un buffer para convertir los 5Vcc a 3.3 Vcc. Generamos nuevamente la señal PWM con las frecuencias de cada motor caracterizado (330hz, 350Hz, 240Hz) a entrada del driver y se colocan las puntas A2 y B2 del osciloscopio como se muestra en la *figura 4.29* y se observan limpias las señales 3.3Vpp con la frecuencia generada por el encoder (*Ver figura 4.31*)

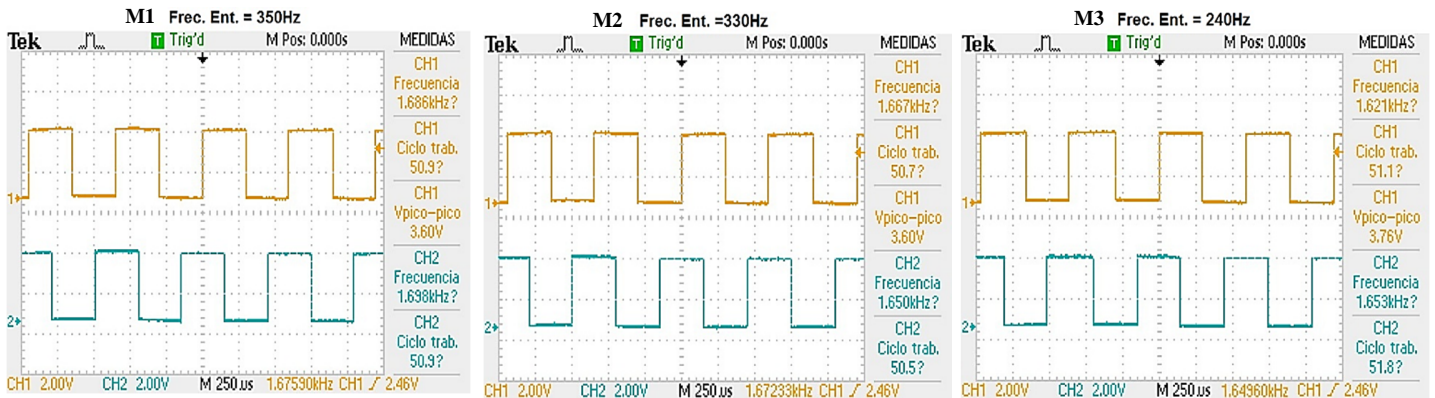


Figura 4.31. Onda Cuadrada 3.3Vpp señales de la salida del Buffer al FPGA.

Con esto garantizamos que nuestros motores, encoders y acondicionamiento de las señales funcionan correctamente para su procesamiento de las señales dentro del FPGA y su control sea óptimo.

4.5.2 Resolución teórica

Una de las incógnitas más grandes que tenemos en la fabricación del sistema es saber si podremos obtener la precisión deseada en nuestro grado de libertad del sistema, necesitamos comprobar si teóricamente podemos obtener la precisión deseada (1µm) de precisión, podemos realizar cálculos teóricos para saber si aunque sea teóricamente se puede obtener esta precisión.

Los motores que tenemos en nuestro sistema son de dos tipos tenemos un motor con de 131.25:1, tiene una resolución en el encoder de 64 conteos por giro del motor, que estos a su vez de la salida de la caja de engranes nos ofrecen 8400, nuestra longitud de recorrido del tornillo embalado de paso de 10mm por 16mm de ancho, esté a su vez cuenta con una tuerca embalada de las mismas dimensiones, esto para poder obtener el movimiento rotacional del eje, convirtiendo este movimiento rotacional a lineal. La resolución teórica con la que cuenta este eje está determinada por la siguiente ecuación.

$$\Delta_z = \frac{L_z}{M * R * C} = \frac{1.34m}{16 * 131.25 * 64} = 1 \mu m \quad \text{Ec. 4.3;}$$

Dónde:

Δ_z = Resolución teórica en el eje Z

L_z = Longitud total efectiva del eje Z

M= Numero de vueltas necesarias para desplazar L_z

R = Reducción de la caja de engranes del motor

C = Resolución de conteos por vuelta del motor.

La resolución con la que cuenta el eje Z es de $1 \mu m$, esto es lo que puede alcanzar el eje Z teóricamente, por cada pulsos leído del encoder del moto reductor.

4.6 Interfaz WiFi

4.6.1 Modulo RN-XV

El hardware de la interfaz WiFi consta del módulo RN-XV y su conexión al FPGA [25]. El módulo RN-XV (*ver figura 4.32*) está basado en el módulo RN-171 de Roving Networks. Básicamente es el módulo RN-171 adaptado a una PCB con el fin de ser compatible con el socket XBee. Este diseño facilita su uso ya que el RN-171 por si sólo es de montaje superficial y su método de soldadura es delicado, además de requerir el diseño de una PCB para su montaje.



Figura 4.32 Modulo RN-XV

También cuenta con una antena integrada a la PCB, LEDs indicadores y una distribución de pines. El objetivo de usar este adaptador y el módulo RN-XV es el de facilitar el uso del módulo y poder llevar a cabo experimentos en una protoboard, evitando así el diseño de una PCB para llevarlos a cabo.

Los módulos WiFly, también conocidos como RN-171, RN-131, son principalmente convertidores de serial a WiFi y viceversa. Cuentan con un firmware integrado el cual facilita su configuración, la cual puede ser mediante un método alambrado (serial) o inalámbrico mediante Telnet.

En este caso se usó el método vía Telnet, debido a su simplicidad. Como se mencionó anteriormente, el módulo RN-XV tiene montado el módulo RN-171, el cual cuenta con dos protocolos seriales de configuración los cuales son el Serial Peripheral Interface (SPI) y el Universal Asynchronous Receiver Transmitter (UART), sin embargo, la PCB del RN-XV fue diseñada de tal forma que para ser compatible con el socket XBee, se prescindió del puerto SPI, con lo cual solo tenemos la opción de usar el protocolo UART como medio de comunicación serial entre el módulo y el FPGA.

Puesto que el módulo RN-XV cuenta con un firmware integrado, el presente trabajo hace uso de la versión 4, la cual es recomendada por el fabricante. Dicha versión también incluye el modo de operación de Punto de Acceso. Las configuraciones por default del Punto de Acceso, creado por el módulo son observadas en la *tabla 4.18* y posteriormente su descripción.

Tabla 4.18

Configuración	Valores por defecto del modo Punto de Acceso
SSID	Wifly-XXX-yyy, donde: XXX es GSX para el RN131 y EZX para el RN171 yy es el byte menos significativo de la dirección MAC
Canal	1
DHCP	Habilitado
Dirección IP	1.2.3.4
Máscara de red	255.255.255.0
Puerta de Enlace	1.2.3.4

- **SSID:** es el nombre del Punto de Acceso que el módulo transmite.
- **Canal:** es el canal que está siendo utilizado por el módulo. Se recomienda que los puntos de acceso cercanos usen diferentes canales para evitar interferencias.
- **DHCP:** (Dynamic Host Control Protocol) está activado y su trabajo es auto asignar / reasignar IP de los dispositivos que se conectan al punto de acceso.
- **Dirección IP:** Dirección lógica del módulo.
- **Máscara de red:** el 0 sirve para especificar los bits de la dirección IP de la red que se pueden utilizar para asignar direcciones IP a los dispositivos que se encuentran en la red.
- **Puerta de enlace:** es la dirección del router que gestiona la red en este caso a través del punto de acceso.

4.6.2 Protocolo 802.11g

El modulo RN-XV funciona mediante el protocolo 802.11g, por lo cual se mencionarán sus características.

- Trabaja en la banda de 2.4 GHz (2402 a 2483 GHz).
- Su tasa de transferencia máxima es de 54Mbps.
- Cuenta con hasta 14 canales, de los cuales algunos no son permitidos en algunos países.
- El protocolo 802.11g funciona en la banda conocida como ISM de 2.4 Ghz (Industrial, Scientific and Medical) y como todo dispositivo de radiofrecuencia, está regulado por la FCC (Federal Communications Commission).

El protocolo 802.11g cuenta con mecanismos de manejo de interferencia, tales como:

- Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA)
- Retransmisión de paquetes
- Selección de canales
- Potencia de transmisión

Sin embargo, es importante destacar que aunque estos mecanismos en robustecen la comunicación, se puede tener un impacto negativo en el ancho de banda del 802.11g, puesto este se ve reducido como tanta interferencia exista. A continuación se muestra una figura en donde se observan los canales en los que opera el protocolo 802.11g y sus frecuencias *figura 4.33*.

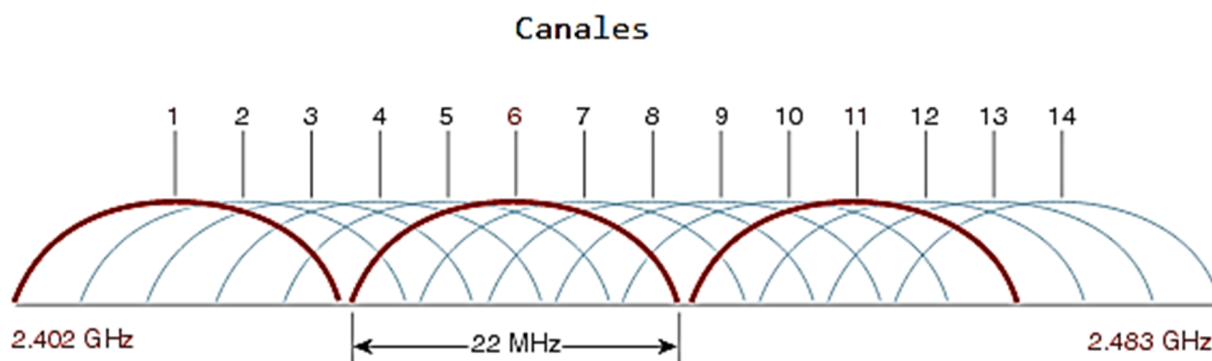


Figura 4.33 Frecuencias de operación del protocolo 802.11g y sus canales

De la figura anterior se observan en color rojo tres canales que no se superponen, por lo que es recomendable distribuir las redes en dichos canales para incrementar el desempeño y disminuir interferencias. A la interferencia que surge cuando varias señales trabajan a la misma frecuencia se le llama co canal.

4.6.3 UART

El módulo RN-XV a pesar de que está basado en un módulo RN-171 y este soporta SPI y UART, la tarjeta en donde está montado fue diseñada de tal forma que solo se puede hacer uso del UART para la comunicación, más en específico un TTL UART, con lo cual se manejan niveles lógicos de 0 volts a 3.3 volts.

EL Universal Asynchronous Receiver Transmitter o Receptor/Emisor Asíncrono Universal permite establecer una comunicación serial entre dos dispositivos. Puede ser de 2 líneas o 4 si se hace uso del control de flujo [26]. El cableado es simple y es el siguiente:

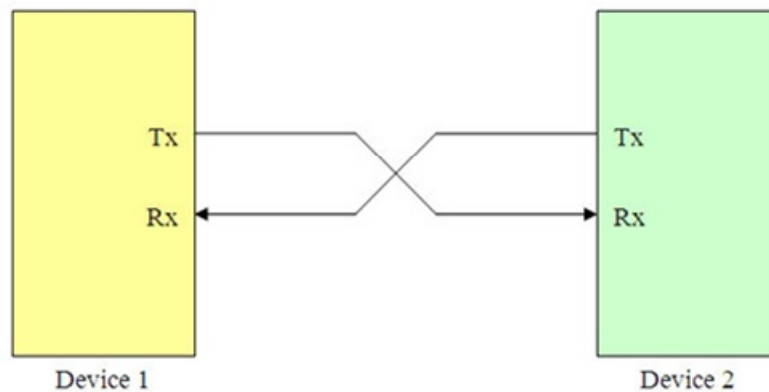


Figura 4.34 Comunicación UART

La principal característica de este medio de transmisión es que no usa una señal de reloj para sincronizar el flujo de datos, caso contrario del bus SPI visto anteriormente o el USART. El hecho de no contar con una señal de reloj simplifica la operación y facilita la implementación de hardware. Sin embargo, hay un precio a pagar y este es que sacrifica velocidad de transmisión. Puesto que no existe una señal de reloj, ambos dispositivos deben de ser configurados para que funcionen a un flujo de datos predeterminado, de tal forma que se podría decir que existe una sincronización pero independiente, a esta tasa de transferencia se le llama baudrate o tasa de bits por segundo. La comunicación básica del UART se muestra en la siguiente figura:

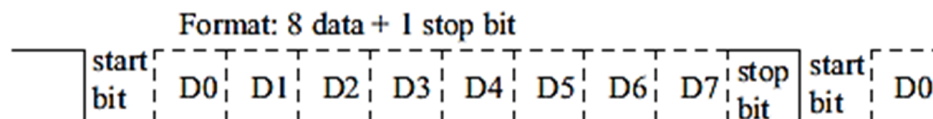


Figura 4.35 Comunicación UART

Como se puede apreciar, la señal está en reposo a un nivel de voltaje “1” y se activa cuando está en un nivel bajo “0”. Cuando la transmisión de información está por comenzar, la señal cambia de “1” a “0” y a este bit se le conoce como bit de inicio.

Los bits de información son transferidos del menos significativo al más significativo usualmente son 8 bits y por último el bit de finalizado. El UART también admite usar bits de paridad, con los cuales se puede detectar y corregir errores durante la transmisión. Para garantizar una adecuada lectura, una vez fijada la velocidad de transferencia dada por:

$$\text{bits por segundo (bps)} = \frac{1}{\text{tiempo por bit}}$$

En donde el total de bits por segundo es el inverso del tiempo que se toma en transferir un bit. Como medida para garantizar una adecuada transferencia, dado que el método es asíncrono, está la metodología del tiempo de muestreo. Se sugiere que en el receptor, exista un tiempo que muestreo el cual sea 16 o 64 veces mayor que el de transferencia, esto significa que si existe algún desfase entre el envío y recepción, se garantiza que hay un rango que sirve como respaldo para que pueda haber una desincronización en las señales y aun así la muestra del bit se tome en el bit correspondiente. En la siguiente figura, se muestra este proceso con más detalle:

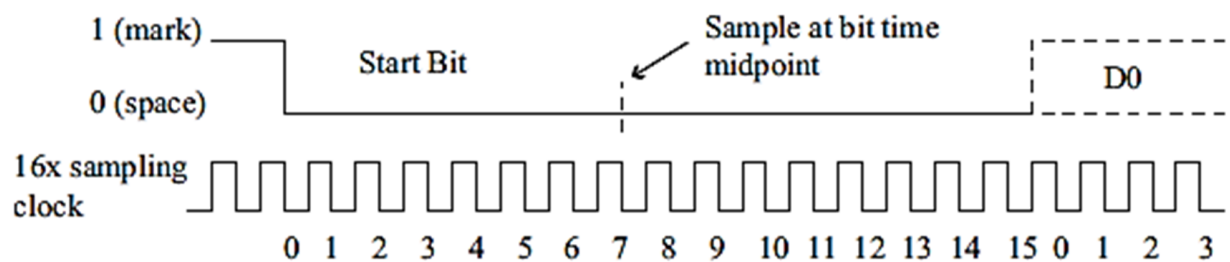


Figura 4.36. Muestreo de los datos a un periodo de 1/16 del tiempo por bit.

Se puede observar que para este ejemplo, se eligió una velocidad de lectura 16 veces mayor, en donde existe un contador que al llegar a la mitad de su conteo marca la pauta para leer el bit. Cabe destacar que a pesar de que se envían paquetes en donde entiéndase por paquete los bits de inicio/fin más los de datos, aunque exista una desviación, esta solo se acarrea hasta que el bit de fin sea recibido, puesto que en cada inicio (recibiendo un bit de inicio) se re-sincroniza la transferencia y así sucesivamente.

4.7 Diseño de la tarjeta de control

En esta sección se presenta el diseño de la tarjeta de circuito impreso (PCB, *Printed Circuit Board*) del hardware, es decir, de la tarjeta de control de los motores y su procesamiento; Para este propósito, se utilizó el software de diseño Altium Designer v13.0.

Altium Designer, es un software de diseño de circuitos basada en PCs, fue la primera herramienta de diseño en hacer uso del sistema operativo Windows; es un software de alta calidad disponible en un paquete

fácil de aprender, usar y comprar. Altium es un sistema de diseño para entorno Windows y proporciona un conjunto de herramientas integradas formadas por un gestor de documentos integrado, una herramienta de captura de diagramas, un simulador analógico basado en SPICE, un simulador digital basado en CUPL (lenguaje similar a ORCAD/PLD), una herramienta de diseño de placas de circuito impreso (PCBs) y soporte para trabajo en red.

4.7.1 Características de la tarjeta

La tarjeta es modular y contiene una tarjeta hija, de esta manera, se puede utilizar para otros fines. Los componentes para la tarjeta son los siguientes: 9 Conectores de entrada Header para los motores de C.D. y piezoeléctricos, 9 Buffer 74LVH04 montaje superficial para convertir el voltaje +5V a +3.3V conectada a la tarjeta FPGA, 3 conectores Header de 8 pines cada uno para conectar los Puentes-H; 4 conectores Header de 50 pines cada uno para conectar la tarjeta hija; 2 conector para la alimentación del circuito +12V y +5V, así como capacitores para filtrado.

La tarjeta hija consta de: un FPGA Cyclone III, 4 conectores Header macho de 50 pines cada uno, un circuito de reinicio, un oscilador de cristal con sus respectivas resistencias y capacitores. A continuación se presentan con detalle las partes de la tarjeta de diseño.

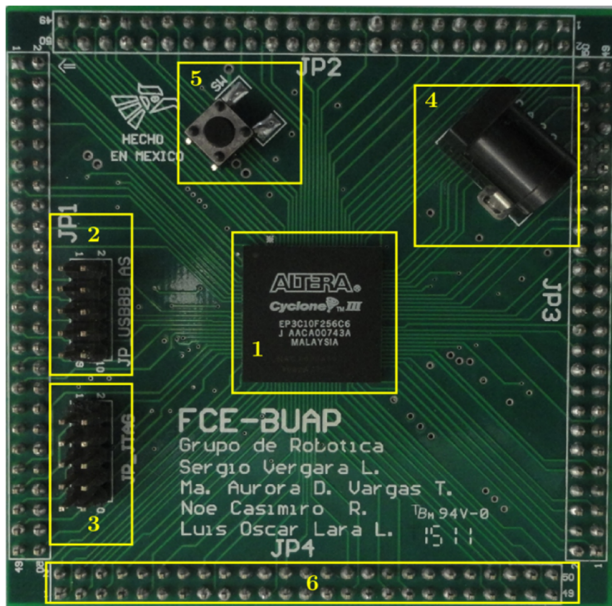
4.7.2 Tarjeta Hija FPGA

La tarjeta hija se muestra en la Figura 4.37, es un diseño de cuatro capas y tiene componentes en la parte superior e inferior. La parte superior, Figura 4.37a, consta de:

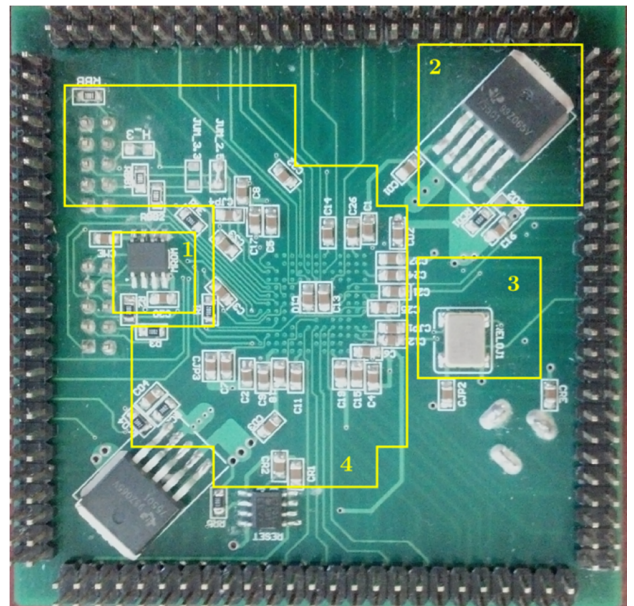
- (1) Un FPGA Cyclone III con matrícula EP3C10F256C6 de Altera.
- (2) Un puerto de programación compatible con el programador usb-blaster.
- (3) Un puerto JTAG.
- (4) Un conector para alimentación externa.
- (5) Un botón de reinicio.
- (6) 4 Conectores header macho de 50 pines.

La parte inferior, Figura 4.37b, consta de:

- (1) Memoria EEPROM (EPC2).
- (2) Convertidor DC-DC de 3.3V a 1.2V.
- (3) Oscilador de cristal.
- (4) Resistencias y capacitores.



(a)Capa Superior



(b) Capa inferior

Figura 4.37 Tarjeta Hija (FPGA)

4.7.3 Diseño de la tarjeta

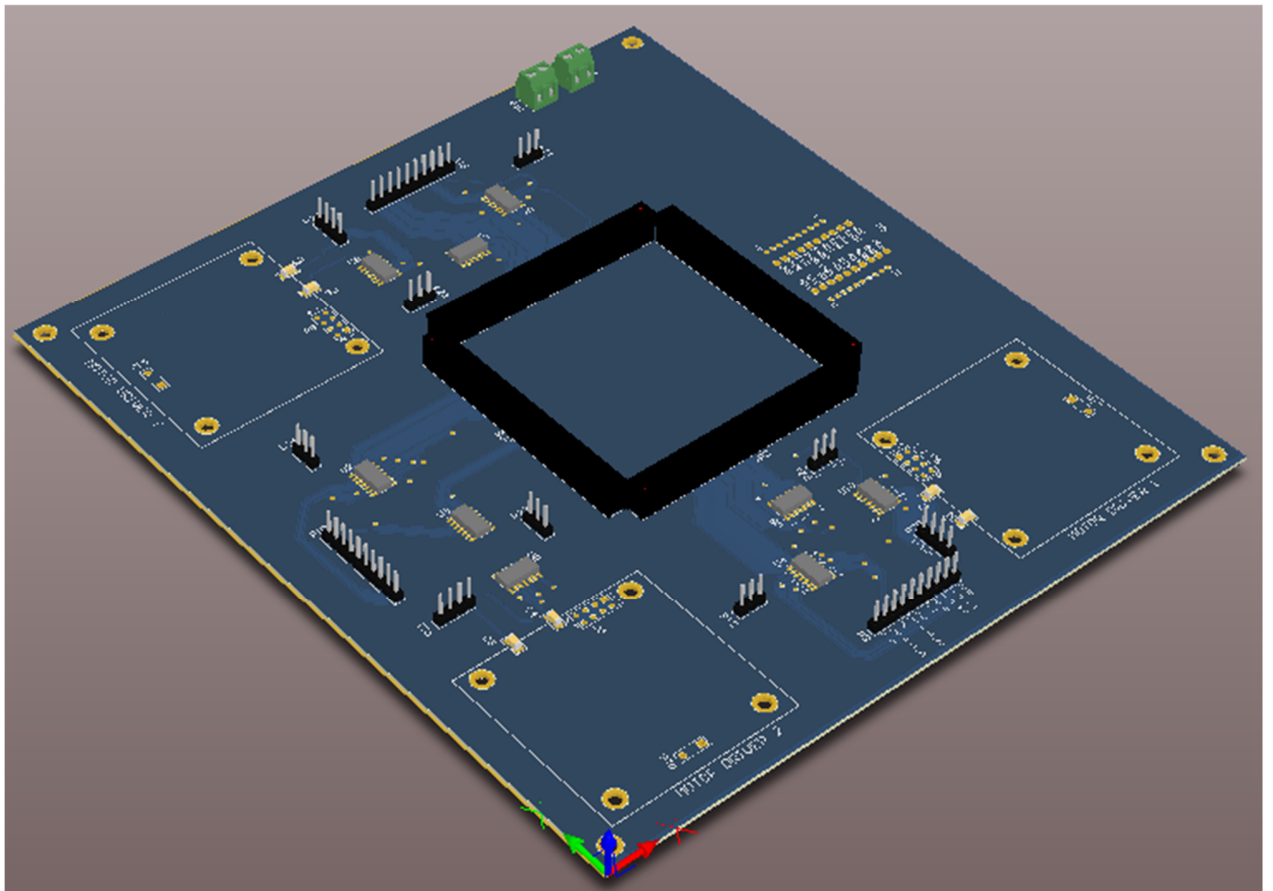


Figura 4.38 Top layer (capa superior)

La tarjeta de control es diseñada con el fin de optimizar las partes del sistema y determine un correcto funcionamiento, se propuso diseñar la tarjeta utilizando *Altium Design 10.0*, consiste en una herramienta de software para el diseño de circuitos y desarrollo de tarjetas electrónicas y simulaciones. El diseño de la tarjeta las compone 4 capas, es decir, la primera capa superior (Figura 4.38) se muestran todos las etapas del sistema y componentes del circuito, así como los conectores para su fácil conexión. La segunda capa consiste en un plano de voltaje, es decir, hay tres pistas de voltaje 3.3V, 5V, 12V, en esta capa VCC se ocupa todo el espacio para interconectar los voltajes para cada alimentación correspondiente. De la misma manera la tercera capa consiste en un plano de tierra de todas las conexiones correspondientes del circuito, por último, la capa inferior es la parte donde todas las pistas son soldadas como se muestra en la Figura 4.39.

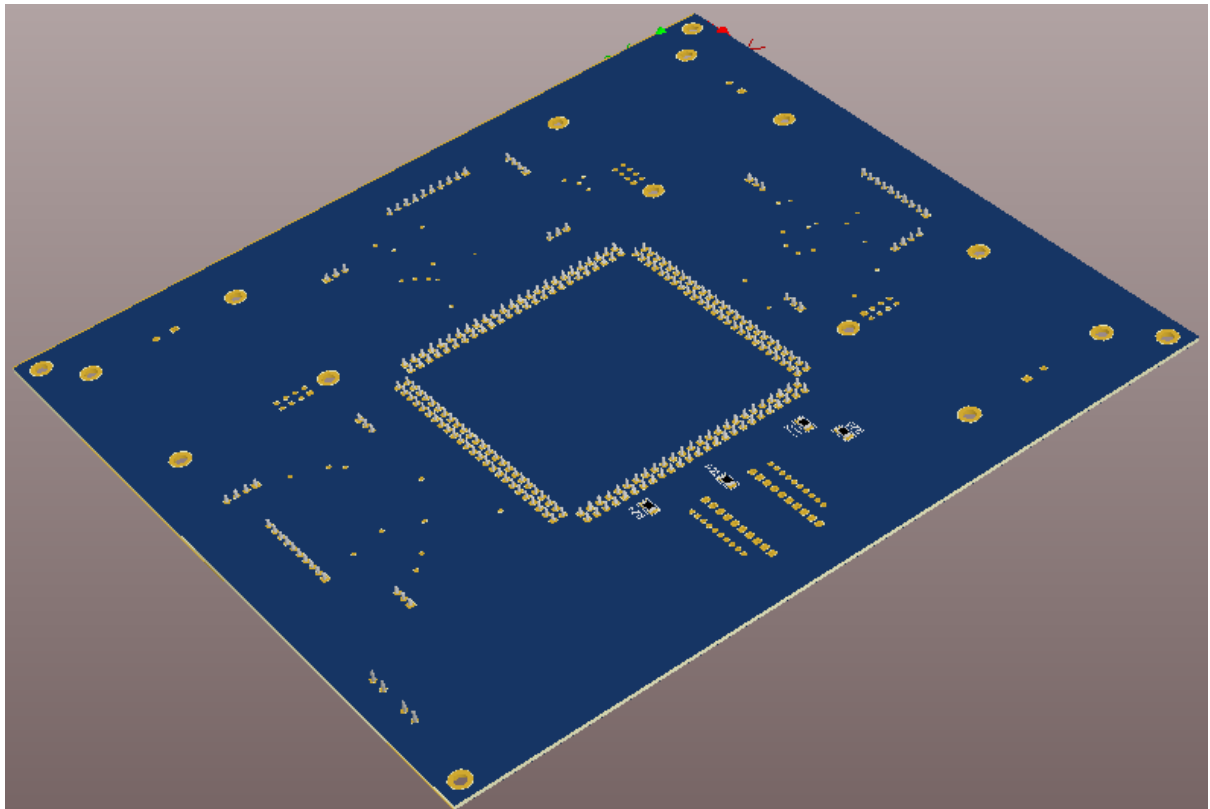


Figura 4.39 Bottom layer (capa inferior)

4.8 Conclusiones

En este capítulo detalla la parte del control del sistema, ésta es la parte importante que se realizó, ya que el control de los posicionadores son los actuadores. Se caracterizó los motores para conocer su frecuencia óptima, ésta es importante para que los motores de CD funcioné de-manera eficiente, es decir, suavizar el movimiento sin forzar el motor, para esto, técnicamente podemos decir que nuestro motor puede trabajar como transmisión directa y aprovechar el torque necesario para el sistema. De igual manera se estudió la etapa de potencia (Puente H) y se comprobó que es eficiente porque el puente H no produce suficiente ruido y se tiene una señal de salida PWM limpia.

CAPITULO 5

FIRMWARE DEL SISTEMA

5.1 Diseño del Firmware

El firmware es la electrónica desarrollada en el FPGA para el control de los tres posicionadores, así como la configuración del firmware del módulo RN-XV para la adquisición de datos. En el diagrama a bloques de la Figura 5.1 se describe la conexión de las etapas requeridas para el sistema.

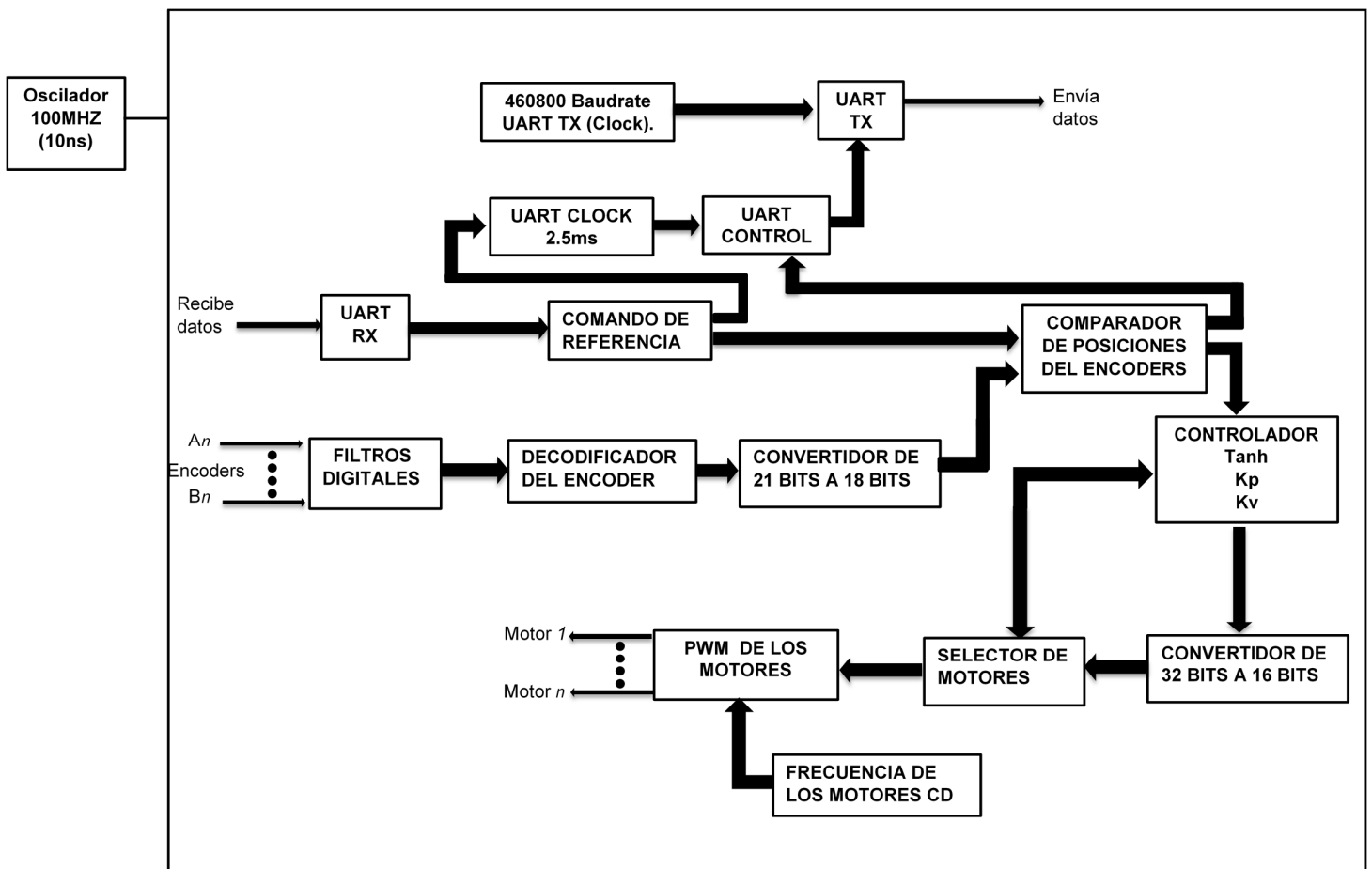


Figura 5.1. Bloques de implementación del Firmware.

5.1.1 Filtro digital

Las señales eléctricas del encoder producen ruido, errores de precisión, tiempo de retardo, sobretiros. Para prevenir este tipo de fenómenos se diseñó un filtro digital como se puede observar en la figura 5.2, el cual tiene la función de retrasar la señal 3 veces el ciclo de reloj para asegurar una señal digital, ya sea uno o cero

lógicos dependiendo en ancho de pulso. Las señales del encoder pasan por el filtro y toma el pulso en alto pasado tres veces el tiempo de reloj.

5.1.2 Decodificador del encoder

Se diseña el firmware para decodificar las señales del encoder incremental, ésta recibirá un pulso cada flanco de subida en A y B del encoder, el diagrama de flujo se implementa por medio de máquinas de estado como se puede observar en la figura 5.2.

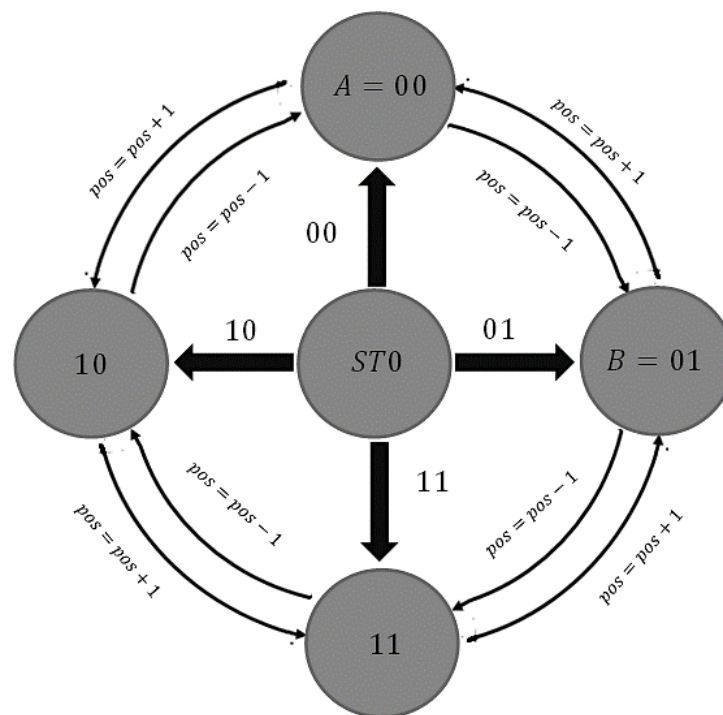


Figura 5.2. Bloques de implementación decoder.

Generamos el bloque con el código en Quartus II en programación AHDL de Altera, con este bloque ya se puede hacer el conteo de las señales del encoder con la precisión sin perder cuentas, garantizando el máximo desempeño de nuestro sistema.

5.1.3 Convertidores de BITS de datos

El bloque de conversión de bits tiene la tarea de recibir un dato de 21 bits y convertirlo en 18 bits, o de 32 bits a 16 bits llenando a ceros los bits que hacen falta para escribir los datos en el FPGA, con esto garantizamos escribir datos sin pérdida de información en el procesamiento de los demás bloques.

5.1.4 Receptor y transmisión de datos UART

El UART es el protocolo de comunicación de datos, puesto que el módulo RN-XV es el único que tiene habilitado para enviar y recibir datos. Para llevar a cabo la comunicación entre el FPGA y el módulo WiFi, se desarrolló el firmware del protocolo UART. El formato serial de los datos del UART puede variar, dependiendo si se hace uso de bits de paridad para control de error. Para este caso, se usaran 10 bits: 1 bit de inicio + 8 bits de datos + 1 bit de paro. La señal está inactiva a un “1” lógico y activa a un “0” lógico. En la figura 5.3, se puede observar el formato de la transmisión de bits. A la tasa de transferencia se le llama baudrate o tasa de bits por segundo.

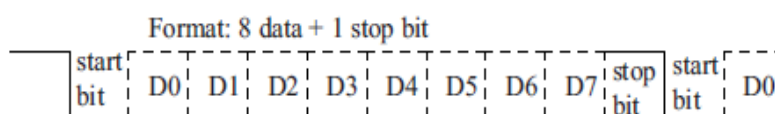


Figura 5.31. Formato de transmisión del UART.

El Universal Asynchronous Receiver Transmitter o Receptor/Emisor Asíncrono Universal permite establecer una comunicación serial entre dos dispositivos. Puede ser de 2 líneas o 4 si se hace uso del control de flujo. El cableado es simple y es mostrado en la figura 5.4.

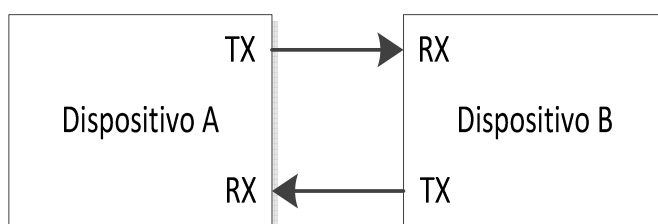


Figura 5.4. Diagrama de conexión de la comunicación UART.

- **Receptor (RX):** Representado por máquinas de estados, en donde se tienen las tareas de detectar el bit de inicio, encontrar el punto intermedio para el muestreo, tomar la muestra, esperar a que termine de transmitirse el bit en cuestión y recibir el bit de paro. Se utiliza un reloj de 100Mhz para el muestreo, con lo que 217 cuentas se requieren para que transcurra una transición de un bit.
- **Transmisor (TX):** Representado por máquinas de estados en donde se tienen las tareas de esperar a que se inicie la transmisión, enviar el bit de inicio “0”, esperar a que se termine de transmitir el bit en cuestión, convertir la señal de paralelo a serial y transmitirla y por ultimo enviar el bit el paro. Cuenta con un reloj que genera una tasa de transferencia de 460800 baudios.
- **Command Reference:** Determina si la información recibida por WiFi es un comando y decide que acción tomar dependiendo de este.

- **UART Control:** Controla al transmisor “TX”, decide cuándo y que dato debe ser enviado. Para la recepción “RX”, no es necesario un control, ya que el firmware está a la espera de recibir un comando por parte del software de interfaz de usuario.

En la siguiente figura 5.5 Y 5.6 se observan las máquinas de estados del firmware correspondientes a los módulos de transmisión y recepción.

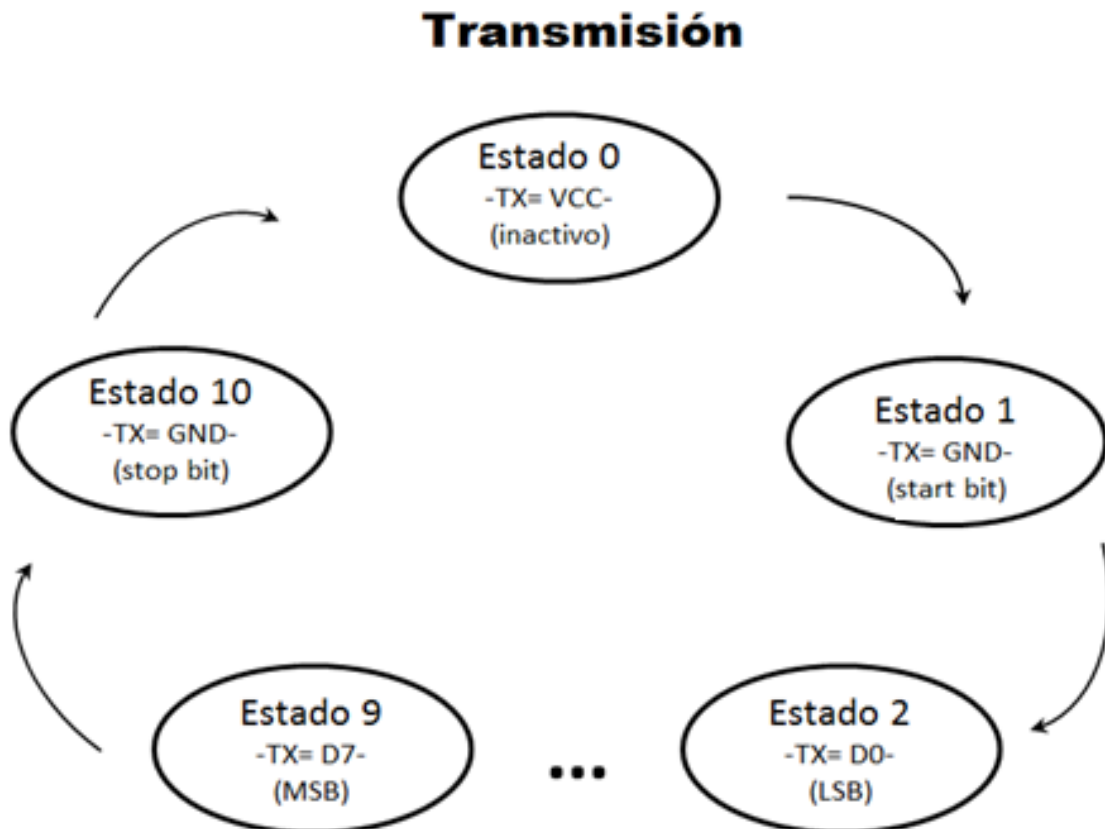


Figura 5.5. Máquinas de estados de la transmisión y recepción del UART.

El módulo de transmisión cuenta con un reloj configurado a 460800 baudios. Cuenta con una entrada de habilitación y entrada de datos y una salida que indica que el módulo está ocupado. El módulo de recepción toma los datos a 100Mhz, sincronizándose a los baudios de transmisión mediante retardos. Esto es debido a que para llevar a cabo una lectura confiable, se leen los datos a la mitad de la transmisión de cada bit. Sus salidas son el byte recibido y un indicador (dataRdy) quien genera un pulso de que el dato ha sido recibido.

EL módulo de UART Control (ver fig. 4.5) es el encargado de enviar los datos hacia el UART_TX y de esta forma, que sean enviados por WiFi al usuario. Los datos enviados son la posición actual y el par aplicado. Tiene una entrada para determinar si el módulo de transmisión está ocupado y otra de habilitación para iniciar una transmisión proveniente del módulo Command Reference. En el módulo anterior, existe una

tabla de comandos en donde se recibe desde Labview un data header de 32 bits. Un data header contiene los datos estructurados en un formato específico para ser procesados por el firmware. El data header es reconstruido a partir de cuarto bytes. El byte más significativo corresponde al comando y los posteriores son los argumentos de dicho comando en el caso donde aplique.

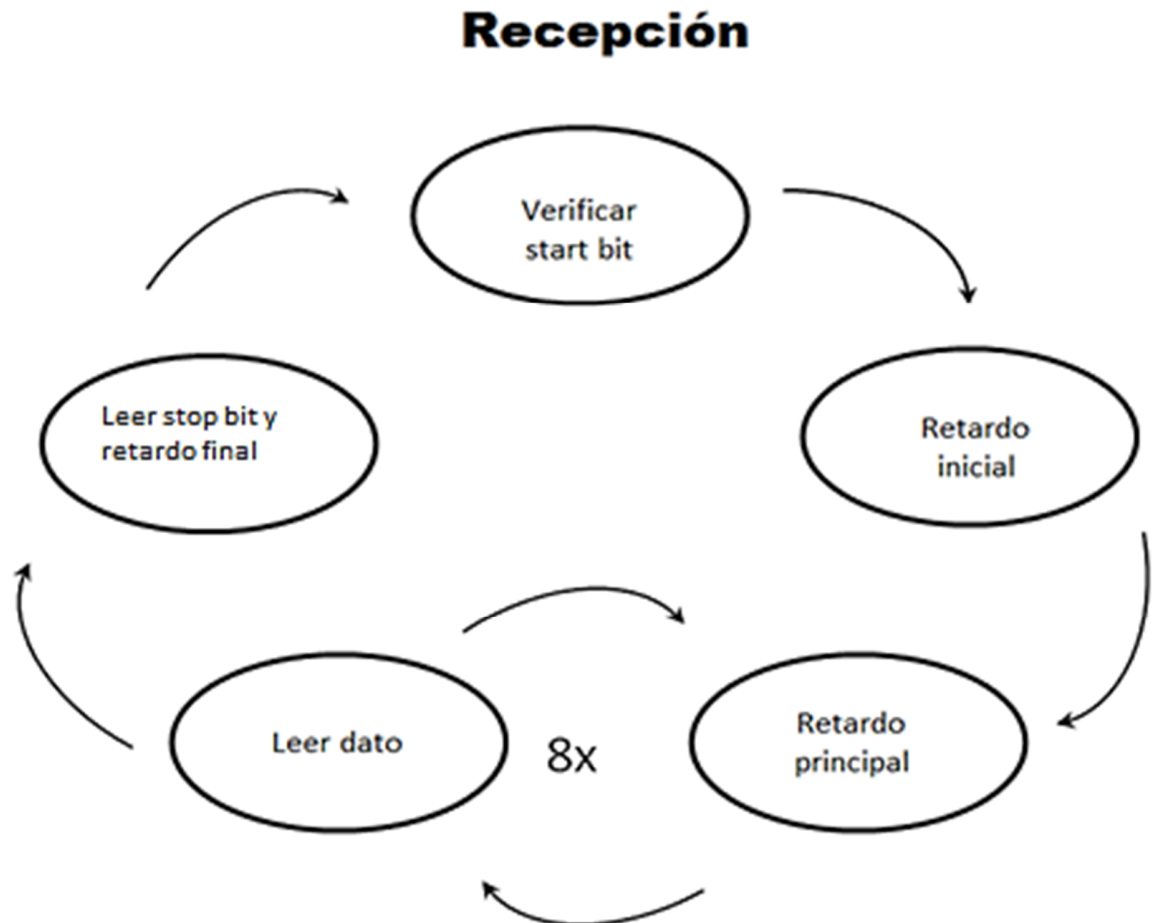


Figura 5.6. Máquinas de estados de la transmisión y recepción del UART.

La posición deseada es un número entero de 20 bits, la ganancia de salida es un número entero de 10 bits y los comandos de paro y arranque no contienen argumentos. En la figura 5.7 se puede observar el algoritmo de reconstrucción del data header, en donde el primer paso para la reconstrucción del data header es identificar que el primer byte sea un comando los cuales tienen la característica de tener el nibble más significativo con valores de unos lógicos. Una vez identificado un comando, se procede mediante una máquina de estados a recibir los bytes restantes hasta reconstruir los 32 bits del data header.

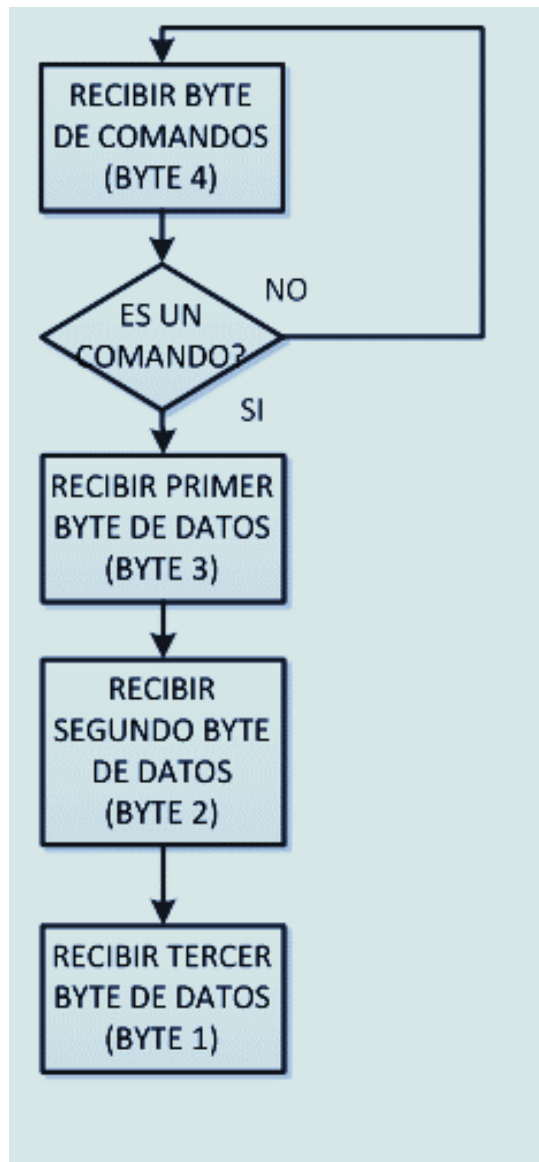


Figura 5.7 Algoritmo del firmware de reconstrucción del data header.

5.1.5 Selector de motores

En el siguiente diagrama de flujo de la figura 5.8, se puede observar la lógica para programar el bloque de selección de motor, el cual solamente tiene una entrada, las cuales son los 16 bits de la salida del controlador, una vez que se hace la elección debe de estar activo y se almacena dentro de un flip flop tipo “enable” para retener el dato y así solamente usar 16 bits de activación para cada grado de libertad.

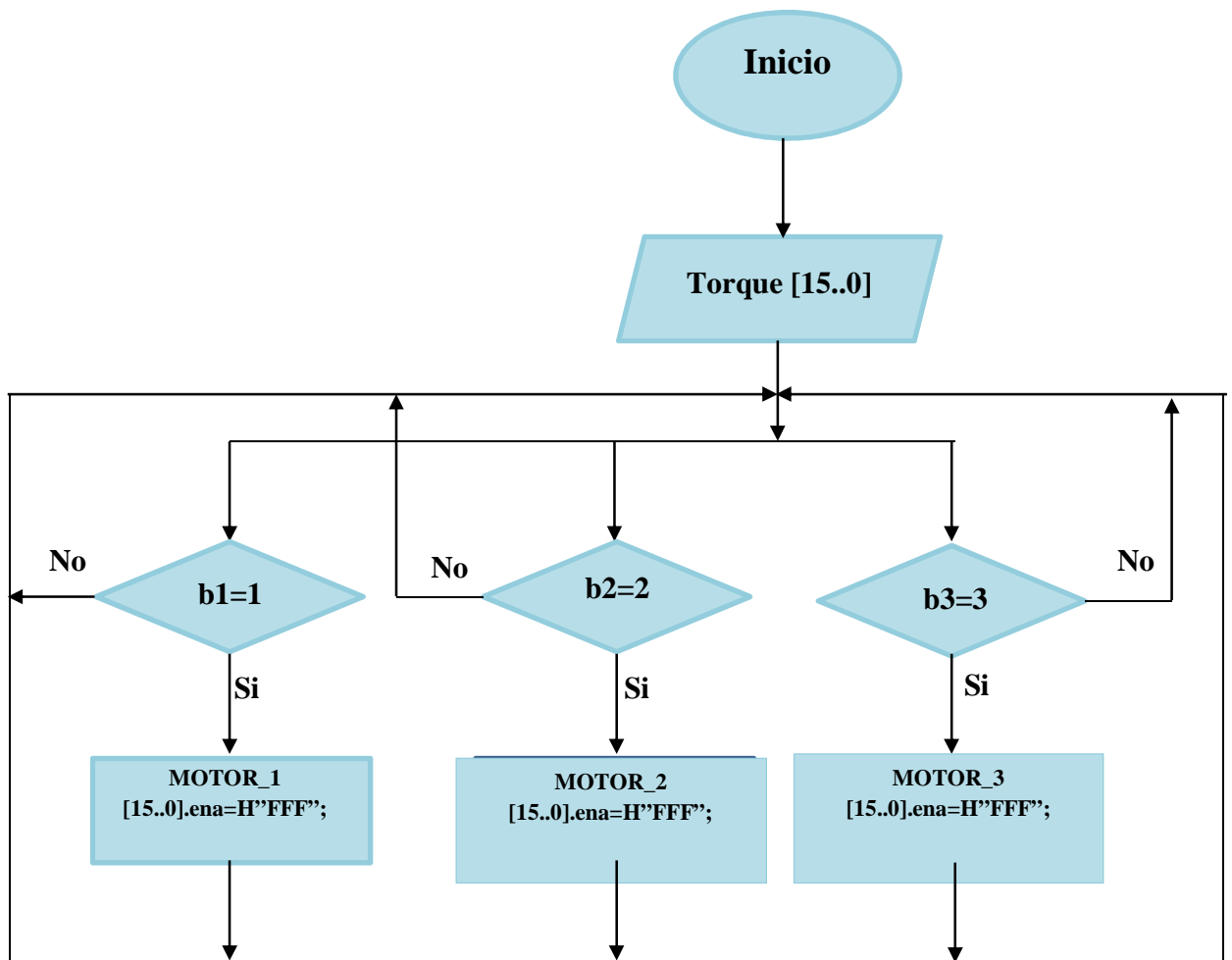


Figura 5.8. Diagrama de flujo del bloque selector de motores.

5.1.6 Controlador Tangente hiperbólico

El corazón del sistema es el controlador que tomará los parámetros como son la lectura del encoder, el error del sistema, las posiciones, las velocidades que se ingresan todo a una ecuación de control, en este caso utilizaremos control PD con argumento de tangente hiperbólico como controlador, ya que es óptimo en el funcionamiento, la ecuación se muestra a continuación:

$$T = K_p * \tanh(E) - K_v * \tanh(v_{el})$$

Dónde:

K_p y K_v = Son las ganancias para el desempeño del controlador.

E = Error del sistema.

v_{el} = Velocidad con la que se desplaza el eje en el riel $\frac{mm}{s^2}$.

τ = Es la energía proporcionada por el controlador en este caso es torque Nm

Para la aplicación del lazo de control se utilizó una estructura de control básico como el que se muestra en la figura 5.9, el cual consta de proporcionar la posición deseada al controlador, por medio del encoder incremental se le proporciona la posición actual del sistema como eso se genera el error, entra al controlador y nos proporciona el par para los motores.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \begin{bmatrix} \tilde{q}(t) \\ \dot{\tilde{q}}(t) \end{bmatrix} \rightarrow 0 ; \forall t \geq 0.$$

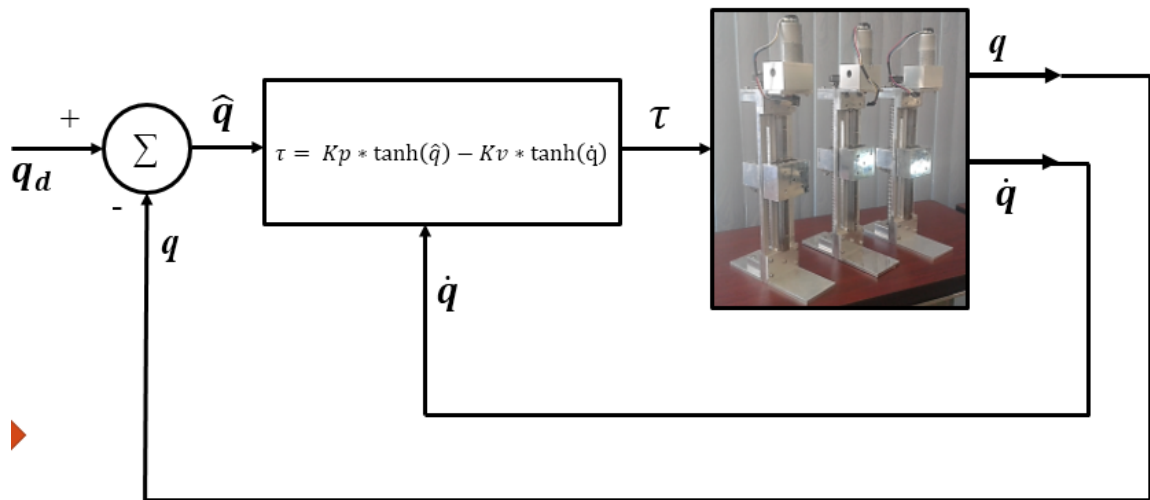


Figura 5.9. Diagrama esquemático de un control en lazo cerrado.

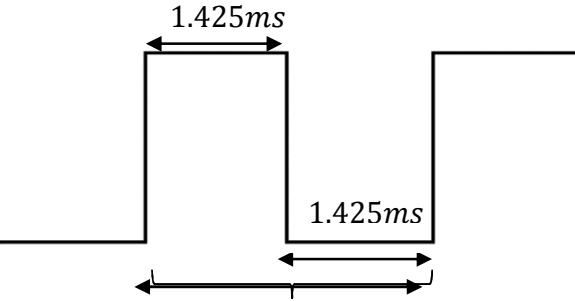
5.1.7 Bloque PWM

Para utilizar la técnica de control de velocidad mediante, el modulador de ancho de pulso se necesita trabajar con ciertas frecuencias, ya que cada motor trabaja con ciertos tipos de frecuencias, ya que aunque sea el mismo tipo de motor con la misma características mecánicas no funcionara con el mismo tipo de frecuencia, por eso se realizó la caracterización del motor, explicada en un capítulo anterior, en dicha caracterización se encontró la frecuencia para el motor 1 de 350 Hz, motor 2 de 330Hz, y motor 3 de 240Hz para realizar el control del motor con nuestro fpga necesitamos generar esta frecuencia, ya que nuestro fpga trabaja con un reloj interno de 100Mhz, necesitamos realizar un retraso en las salida de las señales para poder lograr la frecuencia deseada. Para producir el PWM necesitamos generar nuestra frecuencia de trabajo del motor, utilizaremos un reloj que trae el FPGA que es de 100MHz, necesitamos realizar el retraso de la salida de la señal, para que se logre la frecuencia deseada. Para poder saber el periodo para la generación de las frecuencias, sabemos de antemano que trabajamos con 255 bits, esto quiere decir que nuestra frecuencia debe de ser 255 veces más rápida, esto nos genera un valor de 89.25 KHz(motor 1), 84.15Khz (motor 2), 61.2Khz (motor3), obtenemos el periodo de estas frecuencia, como ya se conoce el periodo con el que se va a trabajar, ahora utilizamos el valor del reloj del FPGA que para este caso es de 100MHz, obtenemos el periodo de esta frecuencia que es de 10 ns y la dividimos por el periodo con el que se va a trabajar y este nos da el valor de 1120 cuentas para el motor 1, 1188 cuentas para el motor 2, 1634 cuentas para el motor 3, y este el valor que

tomara nuestro contador para generar la frecuencias, se diseña el diagrama de flujo para generar el código como se muestra en la figura 5.10, y se realiza la programación en Quartus 13.1 y generamos el bloque de la frecuencia.

Para calcular el contador de 350 HZ se obtiene:

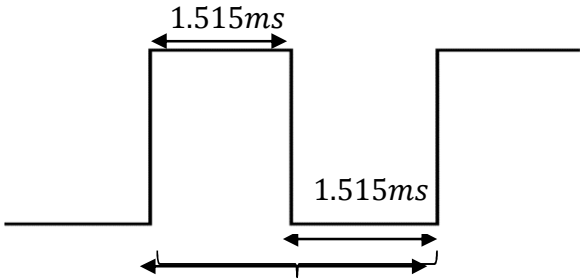
$$T = \frac{1}{89.25 \text{ KHz}} = 11.20 \mu\text{s}$$

$$C_{max} = \frac{11.20 \mu\text{s}}{10 \text{ ns}} = 1120 \text{ cuentas maximas}$$


The diagram shows a square wave with a pulse width of 1.425 ms and a period of 2.85 ms. The period is calculated as $T = \frac{1}{350 \text{ hz}} = 2.85 \text{ ms}$.

Para calcular el contador de 330 HZ se obtiene:

$$T = \frac{1}{84.15 \text{ KHz}} = 11.88 \mu\text{s}$$

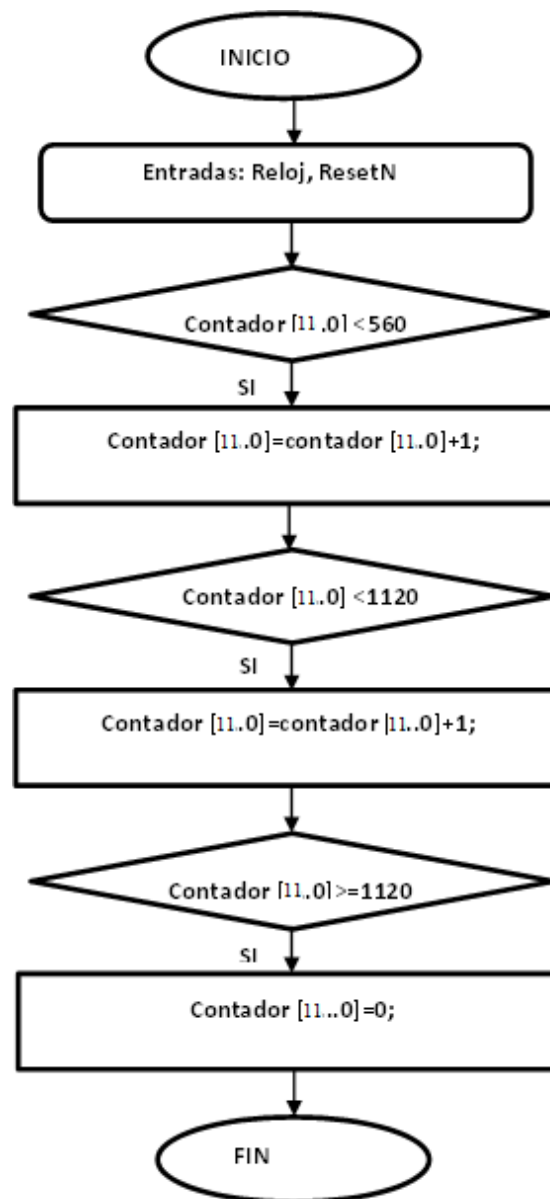
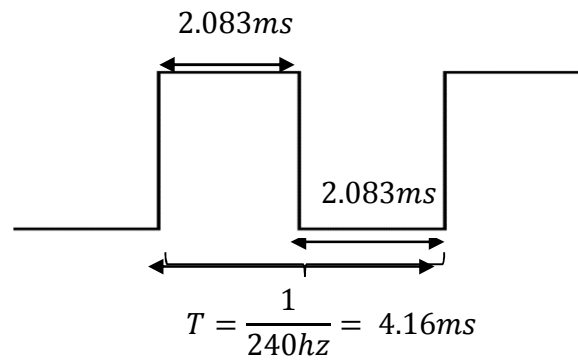
$$C_{max} = \frac{11.88 \mu\text{s}}{10 \text{ ns}} = 1188 \text{ cuentas maximas}$$


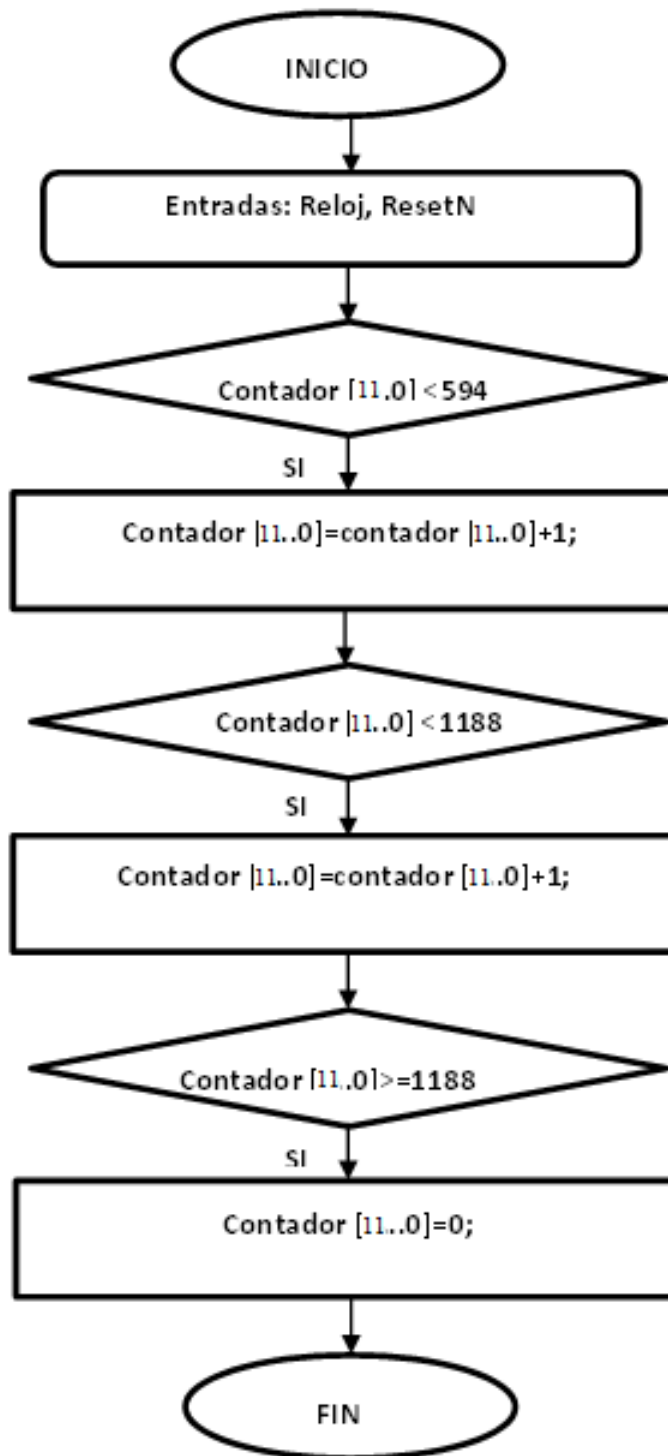
The diagram shows a square wave with a pulse width of 1.515 ms and a period of 3.03 ms. The period is calculated as $T = \frac{1}{330 \text{ hz}} = 3.03 \text{ ms}$.

Para calcular el contador de 240 HZ se obtiene:

$$T = \frac{1}{61.2 \text{ KHz}} = 16.34 \mu\text{s}$$

$$C_{max} = \frac{16.34\mu s}{10ns} = 1634 \text{ cuentas maximas}$$





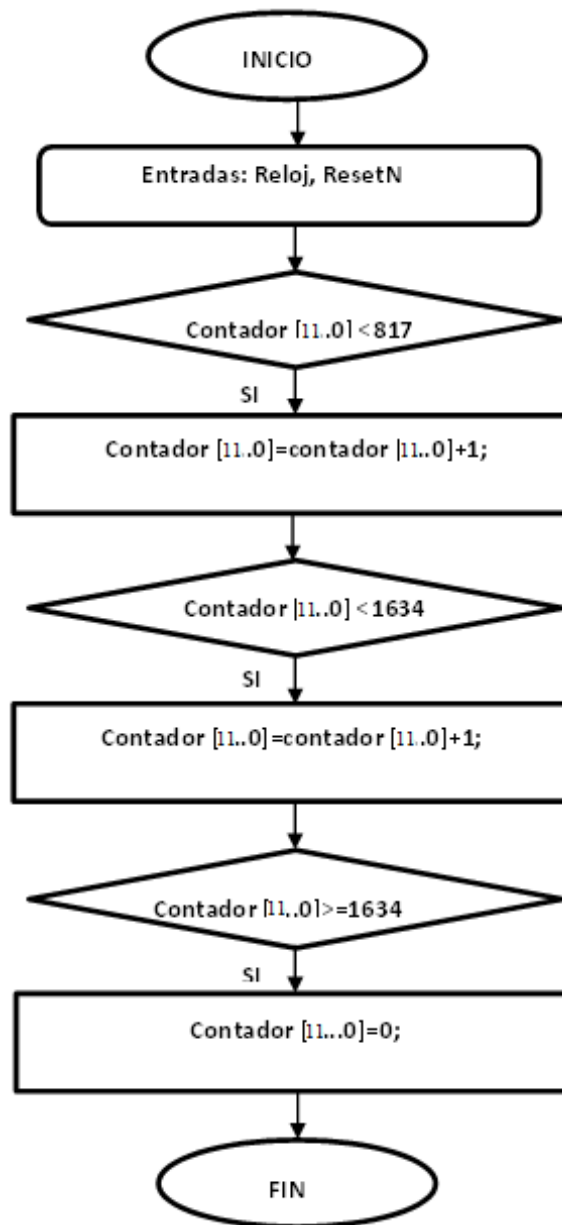


Figura 5.10 Diagrama de flujo de frecuencias

Una vez obtenida nuestras frecuencias, podemos construir nuestro PWM (*Figura 5.10*), el bloque del PWM cuenta con una entrada que es nuestro dato y una salida que es la generación del PWM, en nuestro diagrama de flujo (*Figura 5.10*) se puede observar que se necesita checar el dato que hay en la entrada si el dato es cero, el PWM tiene que estar en el valor en bajo y el contador se debe de inicializar en 1 esto es para evitar que cuando el contador este en cero este en valor en alto una vez que se ah inicializado, se hace una comparación entre la entrada y el contador si este contador es menor que la entrada nuestro PWM debe estar en valor en alto y nuestro contador debe de empezar a contar, si no se hace otra comparación si el contador es mayor a la entrada el PWM debe de estar en valor en alto y nuestro contador debe de seguir contando, para

cualquier otro estado el PWM debe de estar en bajo. En el diagrama de flujo de la figura 5.11, se describe la lógica para programar el PWM, si se requiere la mitad del PWM a la entrada se le proporcionara el dato de 128 y si se requiere un cuarto del valor final del PWM se le proporciona 64 y así sucesivamente para generar el valor entregado por el PWM.

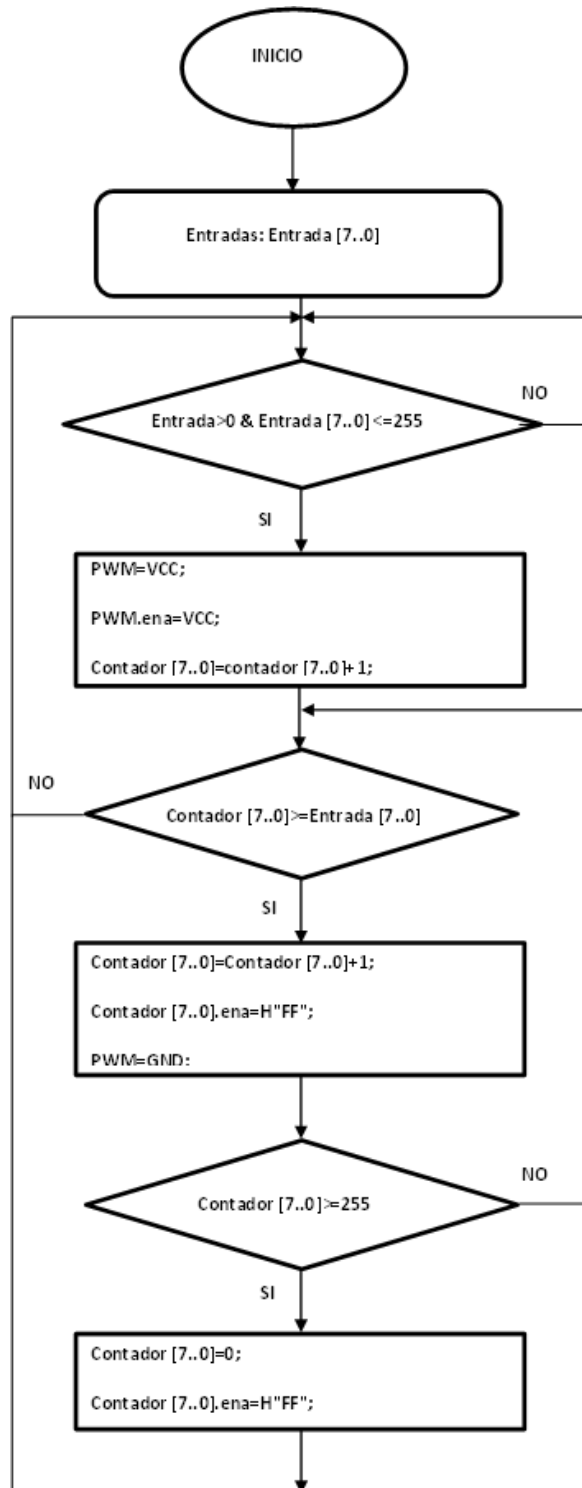


Figura 5.11 Diagrama de flujo de PWM

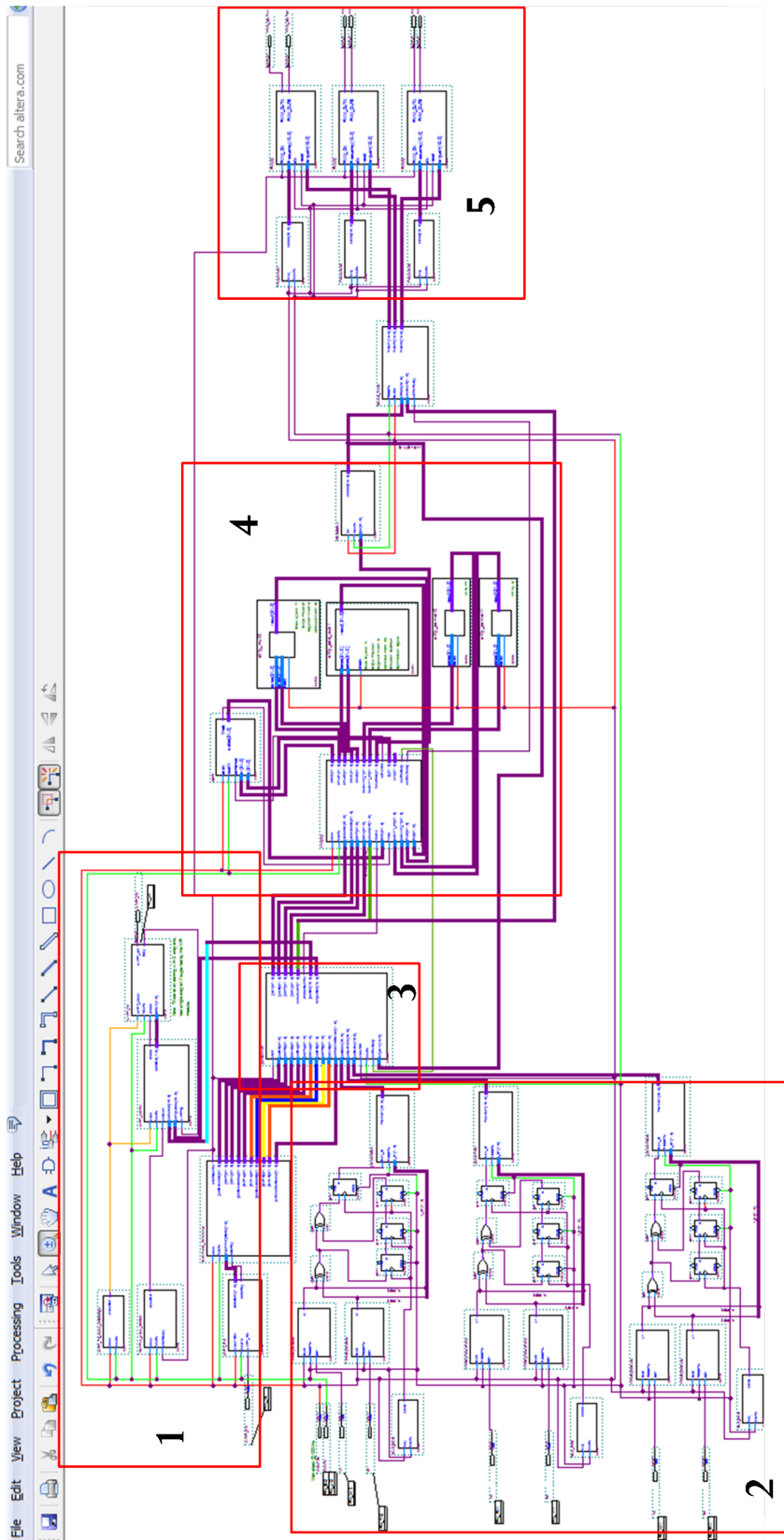


Figura 5.12 Bloques del firmware

En la figura 5.12 muestra una imagen de las partes del firmware que componen la programación en el lenguaje AHDL, las partes ubicadas se enumeran a continuación:

1) Bloque del UART TX-RX.

2) Entrada del Encoder (Decodifica las señales del encoder).

3) Multiplexor donde las entradas son las posiciones deseadas y ganancias provenientes de Labview.

y las posiciones actuales del encoder.

4) Controlador Tangente hiperbólico propuesta para generar Par aplicado.

5) Reciben la señal de Par aplicado y pasan por el PWM, en esta etapa también se generan las frecuencias obtenidas en la caracterización de los motores, y están sincronizadas al PWM.

5.2 Conclusiones

En este capítulo describe la programación que se implementó para el control de los posicionadores, muestra de manera general cada bloque del sistema, de ésta manera se concluyó de manera exitosa el firmware del sistema, se realizaron simulaciones de las posiciones deseadas y torque del sistema, y de esta manera si se obtuvieron resultados esperados sin pérdida de datos. Hasta este capítulo se concluye el objetivo del diseño del firmware.

CAPITULO 6

SOFTWARE DEL SISTEMA

6.1 Diseño del Software

Se pretende proporcionar un medio el cual sirva para que el usuario pueda realizar la tarea de configurar el controlador implementado en el FPGA, así como realizar tareas de monitoreo. La interfaz de usuario se desarrolló en el ambiente de programación Labview, en el diagrama a bloques de la Figura 6.1 se describe la conexión de las etapas requeridas para el sistema.

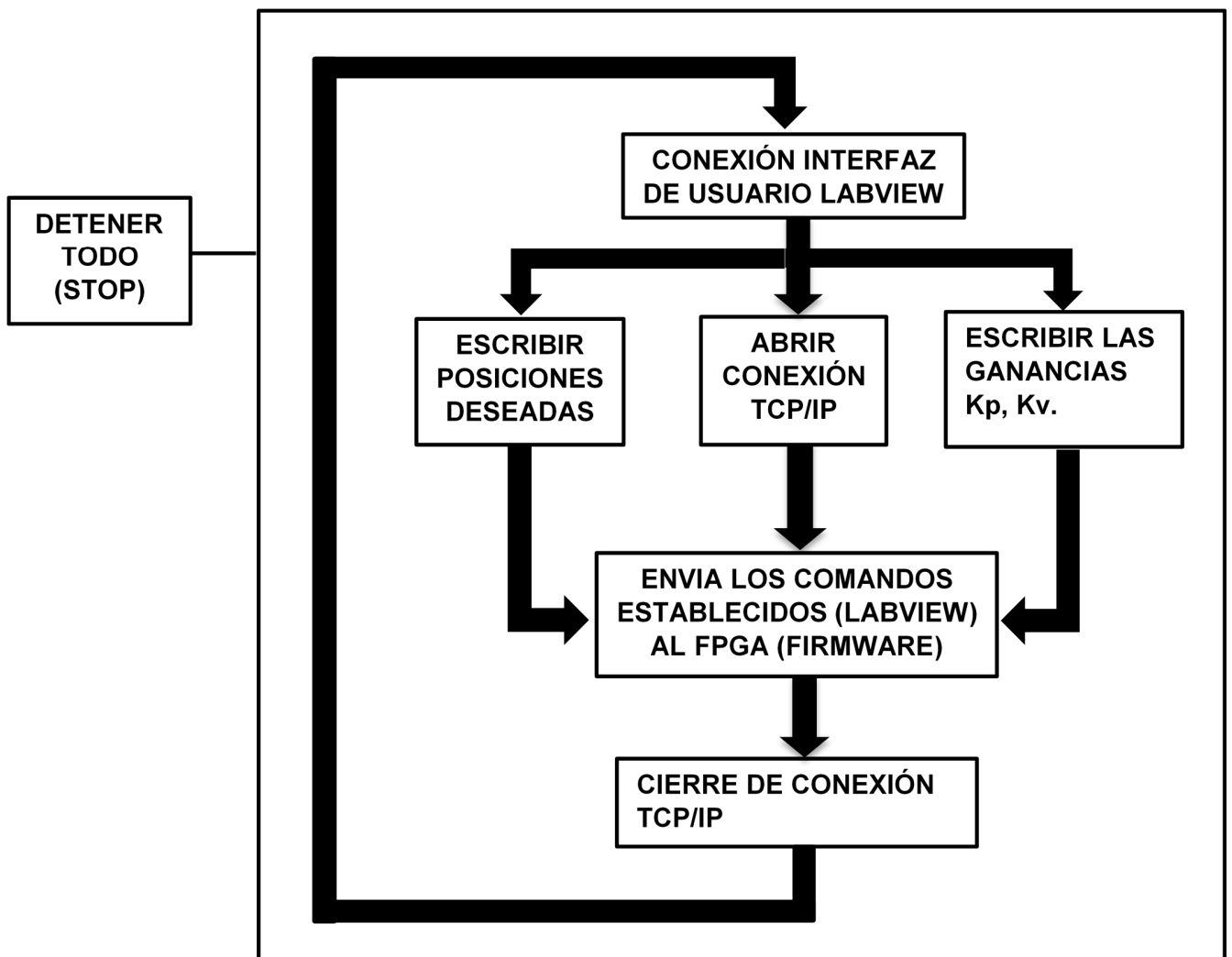


Figura 6.1. Bloques de implementación del Firmware.

6.2 Conexión Interfaz de usuario Labview

La plataforma Labview es utilizada para hacer la manipulación de los posicionadores, éste software de interfaz solo se utilizará para escribir los datos que serán enviados al bloque de comando de referencia que será procesadas en el FPGA. En la figura 6.2 se muestra el panel frontal general para el envío de los datos.

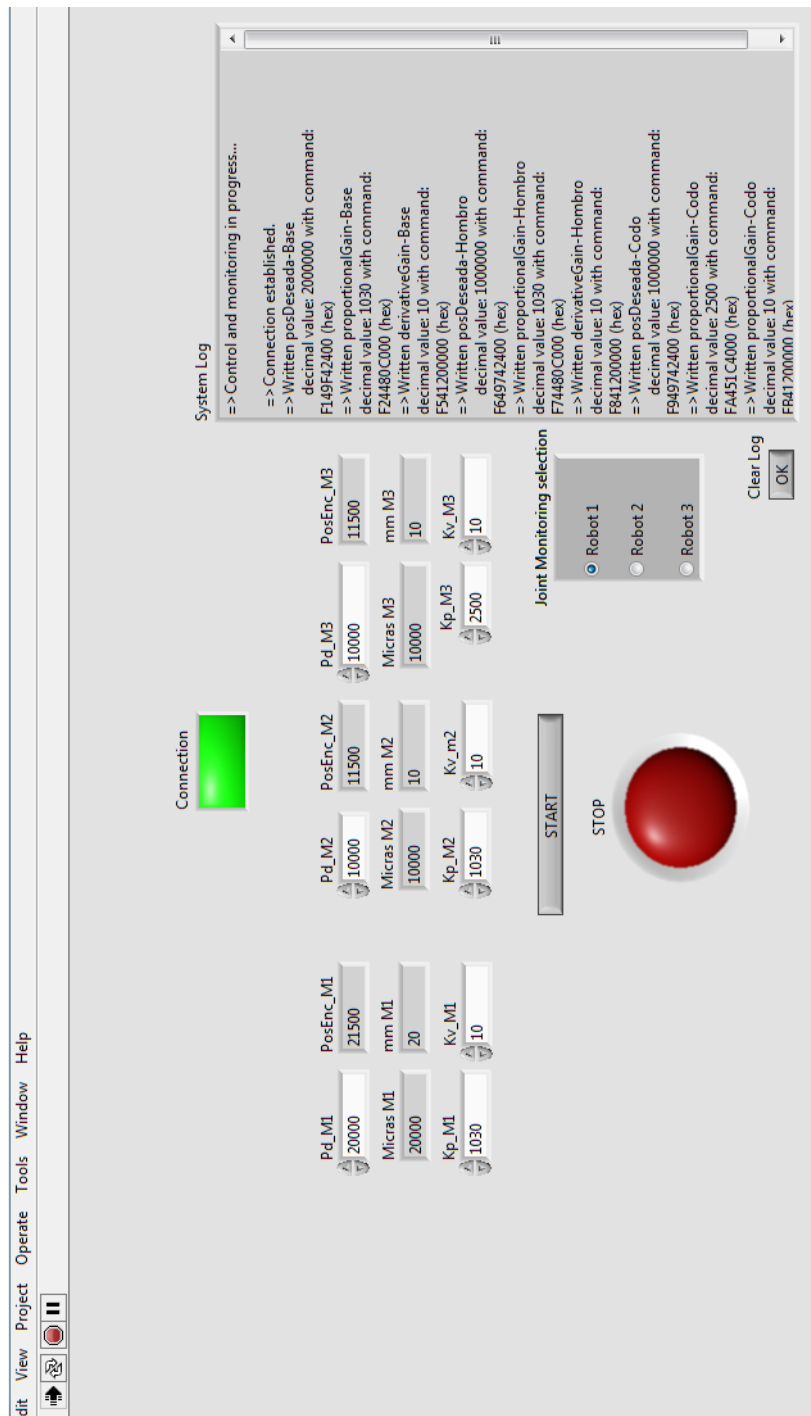


Figura 6.2. Panel frontal Labview

6.3 Programación Labview de los Posicionadores

En esta sección de programación en Labview escribimos las posiciones deseadas del posicionador, posteriormente se convierten mediante un buffer en un dato hexadecimal y son enviados por la TCP junto con un comando para indicarle que acción debe realizar en el Firmware del FPGA. En la Figura 6.3 se muestra un ejemplo de bloque de programación en Labview para las posiciones de los robots.

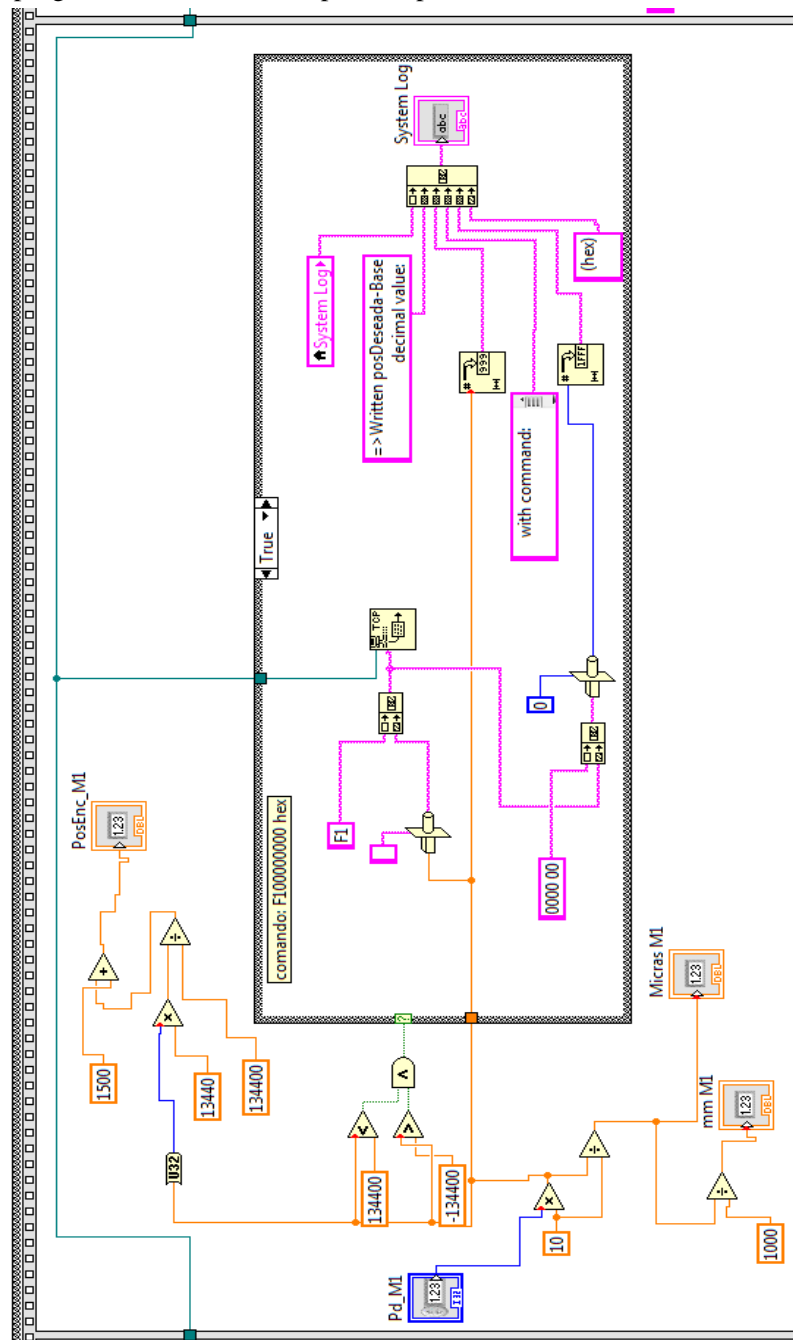


Figura 6.3. Bloque de programación Labview de envío de posiciones

6.4 Programación Labview de las Ganancias

En las ganancias proporcional y derivativo se escriben y son enviados por la TCP junto con un comando para indicarle que acción debe realizar en el Firmware del FPGA. En la siguiente Figura 6.4 se muestra un ejemplo de bloque de programación en Labview de las ganancias dirigidas el controlador.

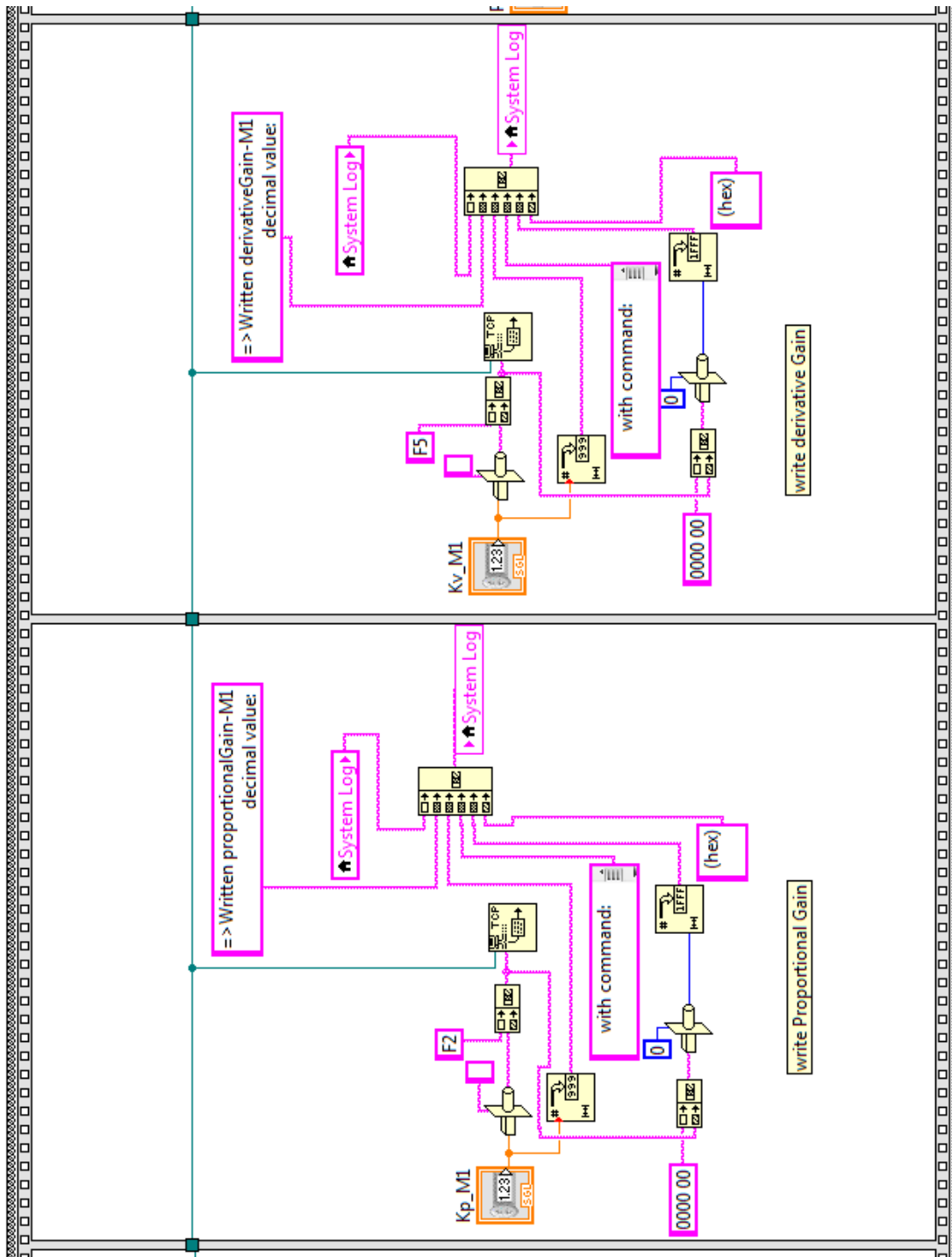


Figura 6.4. Bloque de programación Labview de envío de Ganacia proporcional y Derivativo

6.5 TCP/IP

Labview cuenta con funciones para crear aplicaciones que usen TCP o UDP. Puesto que el TCP es un protocolo más confiable que el UDP, por razones vistas ya anteriormente, se hará uso de éste. Las funciones involucradas con el TCP sirven para poder abrir, leer, escribir y cerrar.

6.5.1 TCP Open/ Abrir TCP

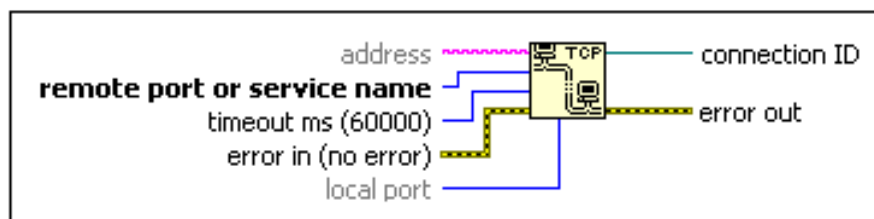


Figura 6.5. TCP Open

Esta función abre una conexión con otro host, en el caso de WiFi, se requiere que se el equipo se encuentre conectado al Access Point del módulo RN-XV. Al usar esta función con el módulo RN-XV, se deben de llevar a cabo las siguientes configuraciones:

- **Address:** 1.2.3.4
- **Remote port or service name:** 2000

Retorna una dirección de conexión (connection ID o identificador de conexión), la cuál puede ser usada en los VI's para la escritura y lectura de información.

6.5.2 TCP Write/ Escribir en TCP

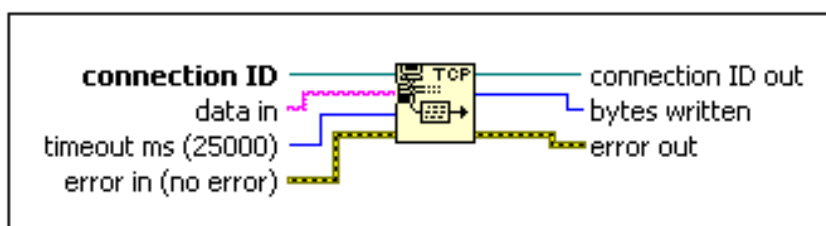


Figura 6.6. TCP Write

Esta función sirve para enviar datos por el TCP, como se puede observar, requiere de un ID de conexión, creado previamente con la función TCP Open. Es importante destacar que la información a enviar debe de estar en formato string, si al información a enviar es de otro tipo, esta tiene que ser convertida a string.

- **Data in:** representa la información que será enviada en string.
- **Timeout ms:** indica el tiempo que la función debe de esperar al escribir, si el tiempo transcurre y la información no ha sido enviada, regresa un error

6.5.3 TCP Close/ Cerrar TCP

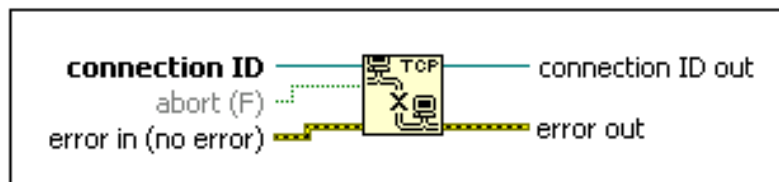


Figura 6.7. Función TCP Close.

Con éste icono de programación se cierra la conexión TCP.

6.6 Escritura

El proceso de escritura en su forma más simple se muestra a continuación.

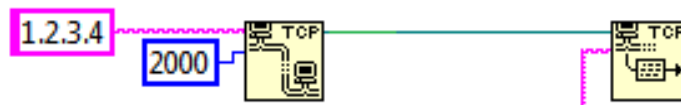


Figura 6.8. Programa en Labview de escritura TCP/IP.

En el anterior ejemplo los parámetros no especificados toman los valores por default. El proceso es simple, una vez que el equipo en uso esté conectado al punto de acceso creado por el módulo RN-XV, el software de la figura anterior realiza tres tareas:

- 1) Establecer la conexión: puesto que el módulo RN-XV opera como servidor, espera solicitudes mediante su IP (1.2.3.4) y por el puerto 2000.
- 2) Escribimos el dato mediante la función TCP Write.
- 3) Cerramos la conexión.

Es de suma importancia tomar en cuenta que al escribir datos, al ser de tipo string, los caracteres escritos no corresponden a valores binarios o hexadecimales como se esperaba. En su lugar, La función asume que los valores introducidos son caracteres ASCII y por tanto toma el código correspondiente a dicho carácter. Puesto que el sistema en desarrollo no pretende que la información enviada sea vista por un humano, sino interpretada por el FPGA, es necesario ya sea trabajar en binario o hexadecimal. Por tanto, si se desea enviar

valores por ejemplo hexadecimales, es necesario especificar en Labview que se escribirán cadenas de bytes en forma hexadecimal. El proceso de escritura entre Labview, el módulo RN-XV y el FPGA es el siguiente:

- 1) Se ordena enviar un dato desde Labview al módulo RN-XV vía TCP.
- 2) El módulo RN-XV se encarga de recibir el dato y convertirlo a una señal serial UART.
- 3) El FPGA detecta en su puerto de recepción del UART que un dato se le está enviando y lo recibe.

6.7 Envío De Comandos

Puesto que la interfaz de usuario debe permitirle al usuario enviar comandos al FPGA para indicarle que acción debe realizar. Como se mencionó en la sección de “UART: Firmware del UART”, se generó un módulo en el firmware, para indicarle al FPGA que se inicie o pare la transmisión de datos por WiFi. El modulo generado es el de “start/Stop” y recibe los comandos que se muestran a continuación:

MSB	Start TX Command - Binary Format						LSB	Hex Format
0	0	0	0	1	1	1	1	0F
MSB	Stop TX Command - Binary Format						LSB	Hex Format
1	1	1	1	0	0	0	0	F0

Figura 6.9. Comandos de inicio y arranque de transmisión WiFi.

6.8 Conclusiones

Para este capítulo se diseñó la parte del software del sistema, se realizó la comunicación pro WiFi y Labview solo se utiliza como escritura de datos que son enviados al firmware del FPGA y la interpreta mediante comandos para su ejecución, todo el control es procesado en el firmware.

CAPITULO 7

RESULTADOS DEL EXPERIMENTO OPTICO

7.1 Pruebas y resultados de sistema posicionador

Los posicionadores con movimiento en el eje z se realiza el control de posición con una resolución de $1\ \mu\text{m}$ como se demostró teóricamente en secciones anteriores. En la Figura 7.1 se muestra los posicionadores montados en el experimento, así como también la electrónica.

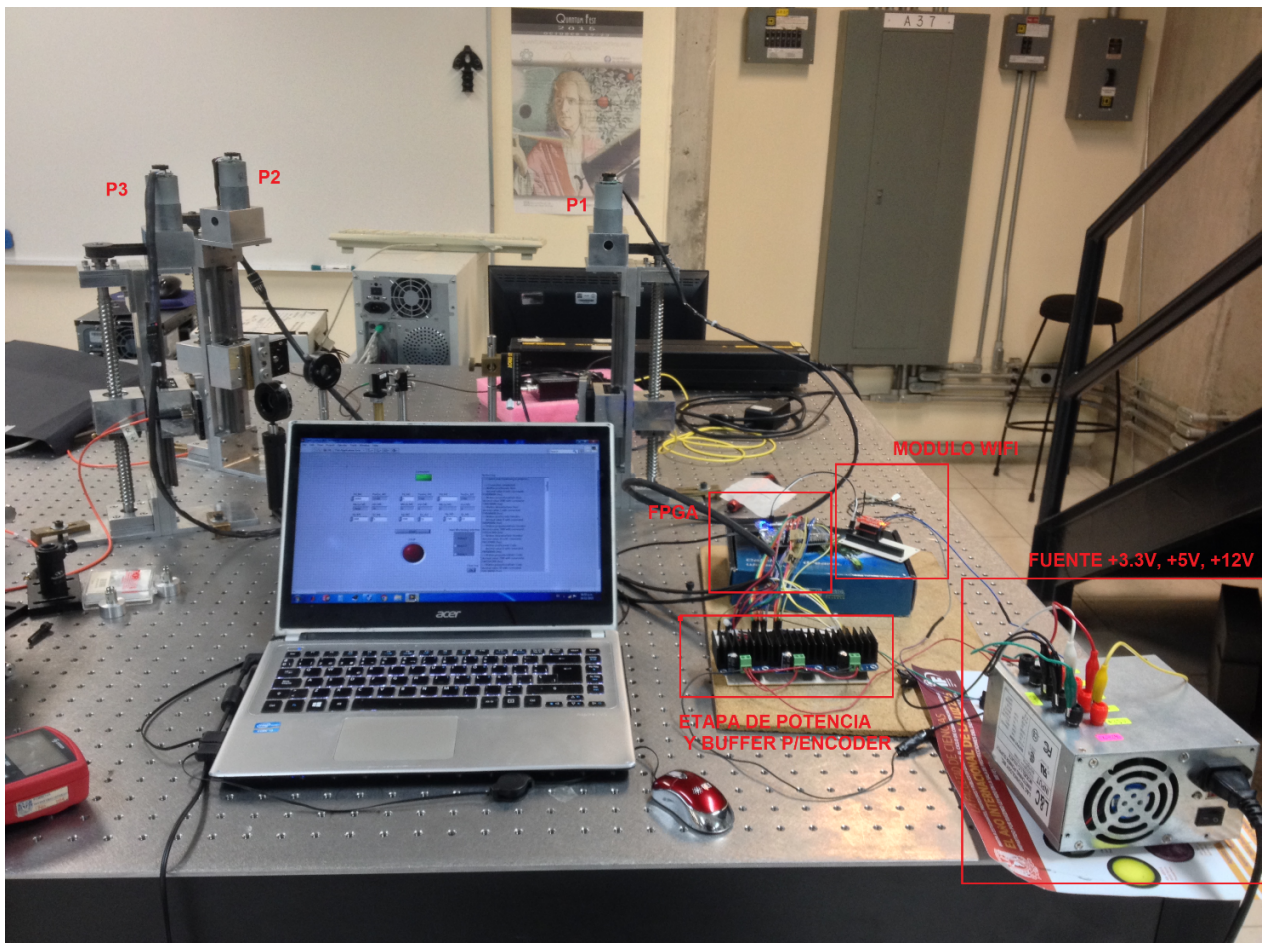


Figura 7.1. Posicionadores montados en la mesa Óptica.

En la figura 7.2 se observa la parte receptora del experimento, consiste en colocar las tres fibras ópticas en cada posicionador (P1, P2, P3), En P1 será el centro del patrón de interferencia representada como la distribución LG0 y los fotones serán recibidos por una fibra óptica monomodal. En P2 y P3 recibirá el patrón de interferencia con Momento Angular Orbital $L=1$ y $L=-1$ y tendrán fibras ópticas multimodal. En la figura muestra dos espejos reflectores que tiene la función de desviar la intensidad de luz a otra dirección y posteriormente pasan por los polarizadores para atenuar la intensidad de luz proveniente del láser.

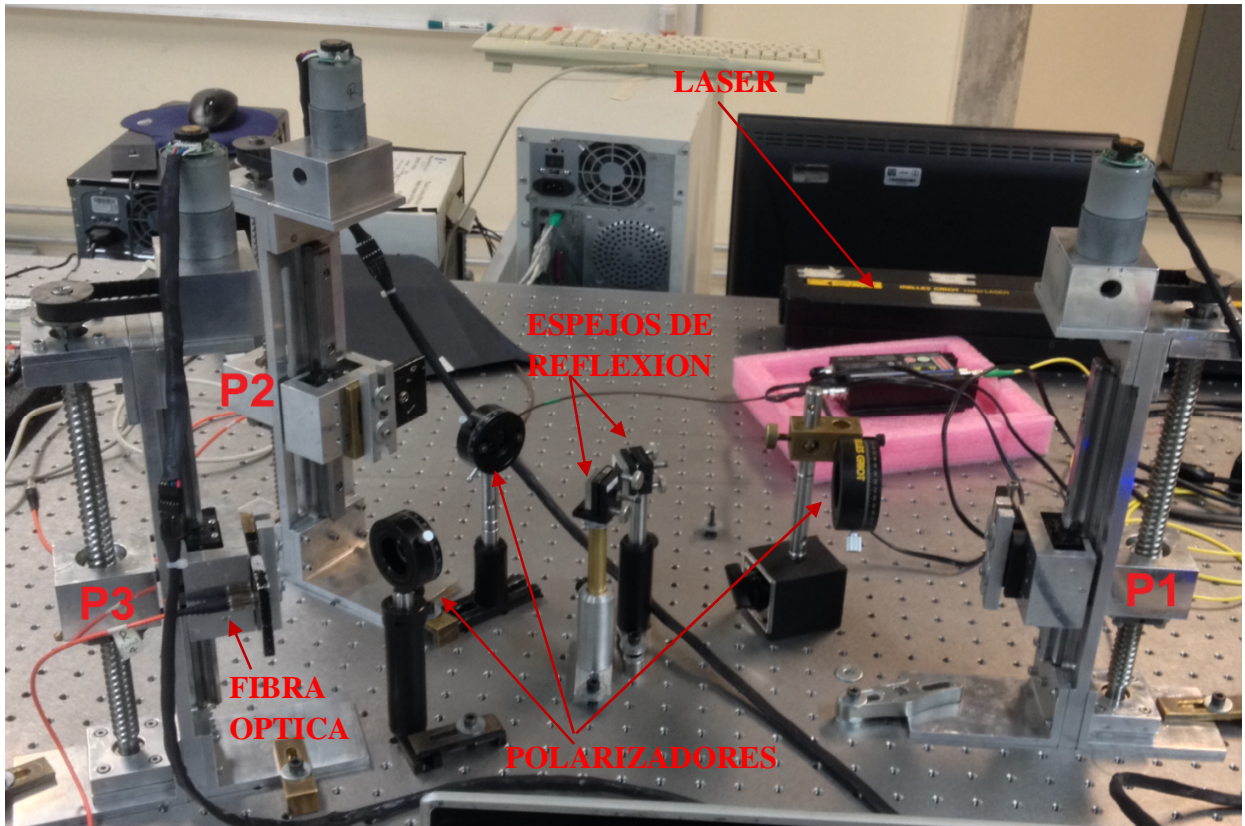


Figura 7.2. Montaje experimental receptora

En la figura 7.3 muestra una tarjeta de prueba para las conexiones de los motores, encoder, módulo WiFi y el FPGA, nos ayudará a compactar el número de conexiones y así evitar cortos circuitos, ésta tarjeta está adaptada para conectar directamente a la tarjeta Hija FPGA, así como la tarjeta del módulo WiFi. Los puentes H se adaptaron de manera de insertar directamente a los Headers.

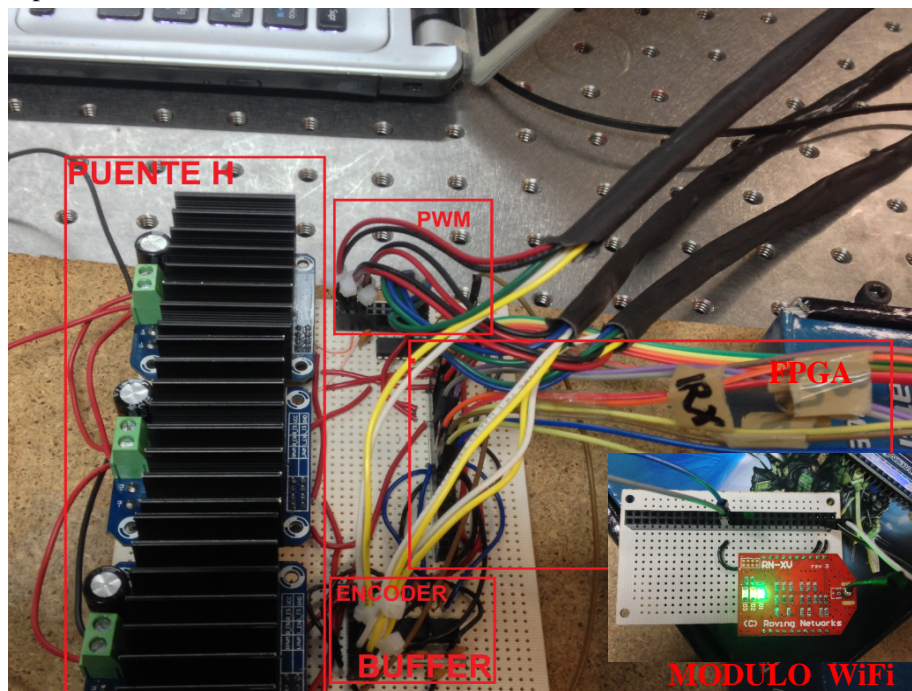


Figura 7.3. Tarjeta de prueba electrónica.

En el control de los posicionadores se aprovecha la resolución del encoder y por cada conteo del encoder equivale a moverse $1.19\mu\text{m}$, en la figura 7.4 es un ejemplo de simulación en tiempo real que es parte integral del software quartus II llamada Signal Tap II, y consiste en conectar el FPGA a la computadora y se comunica mediante programación JTAG y es así como podemos simular todas las entradas y salidas declaradas en el firmware y ver su comportamiento físico del sistema, para este caso se está simulando tres posiciones actuales de los encoders como se muestra en la figura 7.4, la primera se muestra como el posicionador 1 (P1) se está moviendo y tiene como posición actual 10095, esto quiere decir que su posición actual es 8595 conteos + 1500 posiciones que es la cuenta inicial (Punto Cero inicial) que sería igual a 10095, en otras palabras, por cada conteo que se esté sumando es $1.19\mu\text{m} \times 8595$ conteos es igual a que el posicionador lleva desplazado $10228.05\mu\text{m}$ (10.22mm). En P2 y P3 se encuentran en la posición cero (1500), al comprobar en tiempo real el control de posición, se observaron de varias pruebas que no hay pérdidas de conteo en la resolución del encoder, esto quiere decir que garantizamos 100% la posición deseada.

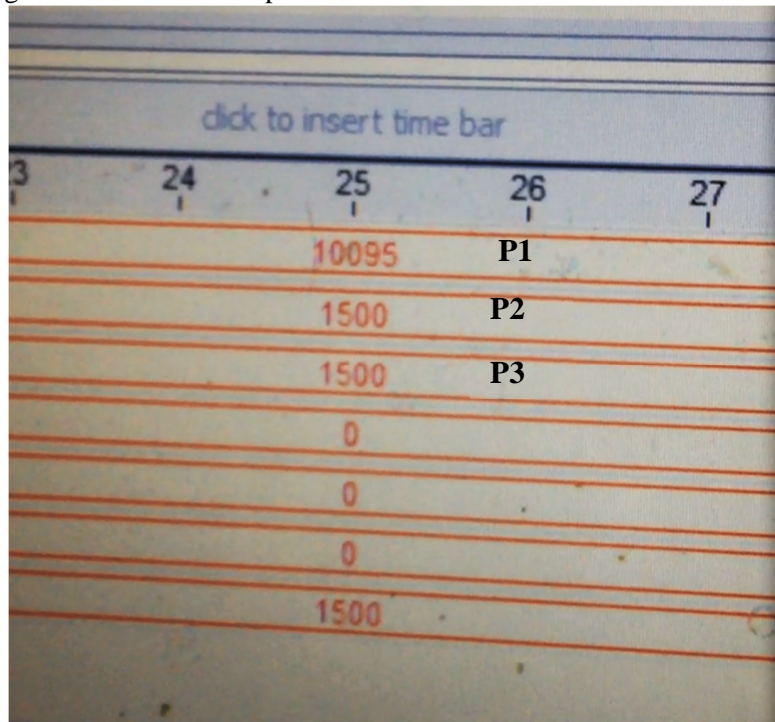


Figura 7.4. Simulación en Signal Tap II

7.2 Resultados del experimento Óptico

En la Figura 7.5 se muestra el arreglo experimental y sus componentes: láser clásico, el acoplamiento de los colectores de luz a la fibra óptica montados en los posicionador y el detector APD (fotodiodo de avalancha) de un canal. Este arreglo se utilizó para probar el sistema compuesto de: Hardware, Firmware y Software de los posicionadores.

Para verificar la funcionalidad del hardware, firmware y software, se realizaron pruebas con el experimento de Momento Angular Orbital de conteo de fotones, que consiste en encontrar el máximo número de fotones en el escaneo de la distribución, es una manera de calibrar y atenuar las intensidades de luz que provienen del láser, y posteriormente se pueden realizar las pruebas de correlación de fotones con Momento Angular Orbital, para fines de pruebas posicionador-experimento solo se realizaron escaneo para el conteo de fotones.

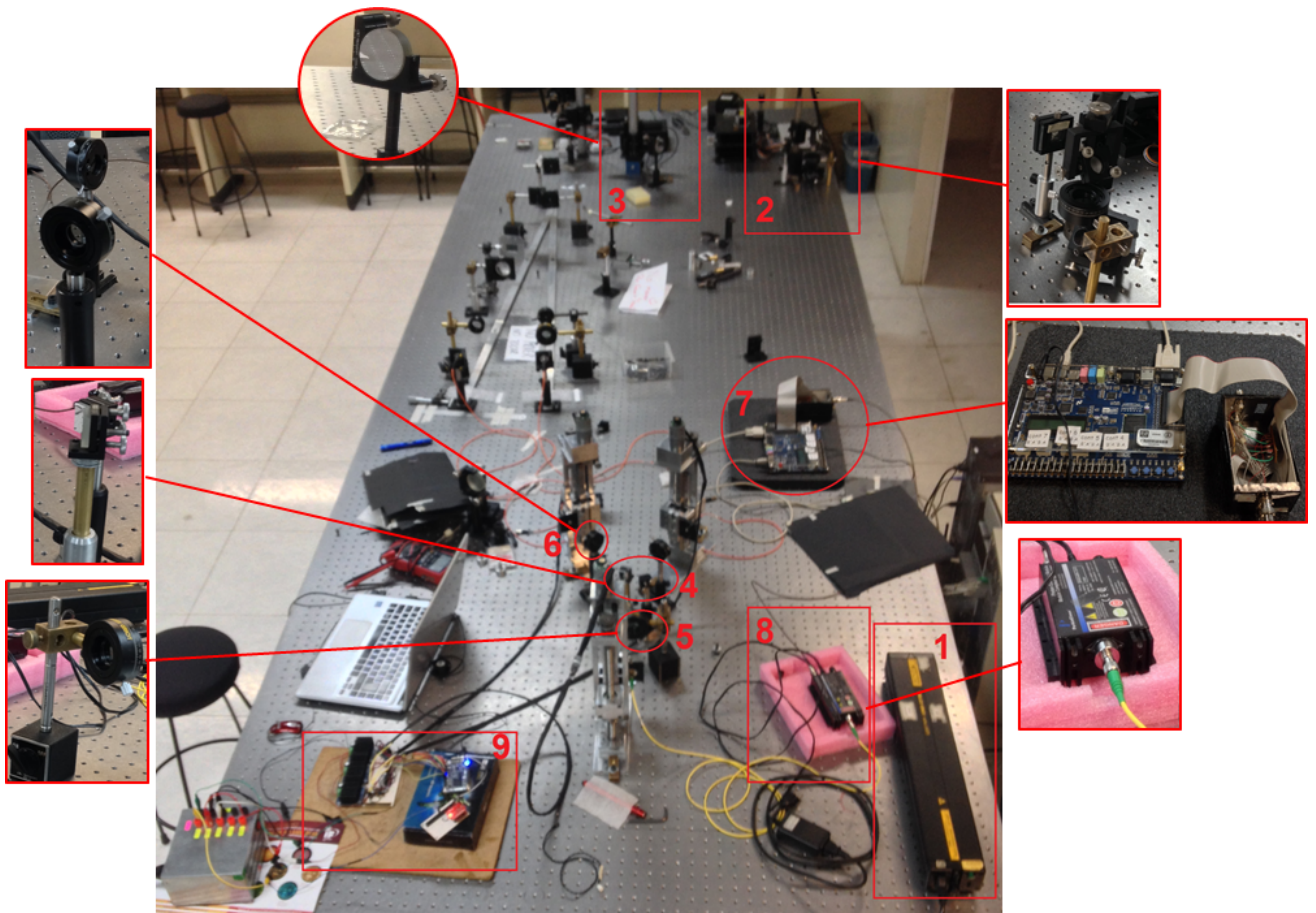


Figura 7.5. Arreglo Optoelectrónico

En la figura 7.5 muestra imágenes de las partes del experimento que las componen, a continuación de enlistan algunas de ellas:

- 1.- Láser Clásico gaussiano de 630nm.
- 2.- Arreglo de atenuación con polarizadores y espejos de reflexión pasando por la rejilla de difracción que produce Momento Angular Orbital.
- 3.- Espejo de reflexión.
- 4.- 2 espejos de reflexión, una desvía la distribución $L=1$ para P2, y la otra $L=-1$ para P3.
- 5.- Atenuador de luz para la distribución LG0 que pasa al posicionador P1.
- 6.- Atenuadores de luz para la distribución $L=1$, $L=-1$ que pasa a los posicionadores P2, P3.
- 7.- Tarjeta FPGA Cyclon II de prueba para conteo y coincidencia de fotones, ésta está conectado directamente a la PC.

8.- Detector APD (Fotodiodo de Avalancha) de un canal, está conectado como entrada la fibra óptica y como salida a la tarjeta de desarrollo FPGA.

9.- Tarjeta de prueba (FPGA, Modulo WIFI, Etapa de potencia, Encoder) para el control de los posicionadores P1, P2, P3.

7.2.1 Prueba simple para el conteo de Fotones

La primera parte de las pruebas del experimento es encontrar el máximo número de fotones en cada distribución con Momento Angular Orbital, y necesitamos desplazar el posicionador vertical a una mayor resolución para encontrar con mayor exactitud los conteos máximos. La primera grafica de la figura 7.6 es un escaneo de la distribución cero, que es la que proviene del Laser y es la misma que pasa por la rejilla de difracción, ésta nos da una mayor intensidad, por lo que, al atenuarlo con los polarizadores obtenemos menor intensidad y podemos medir a menor escala el conteo de fotones.

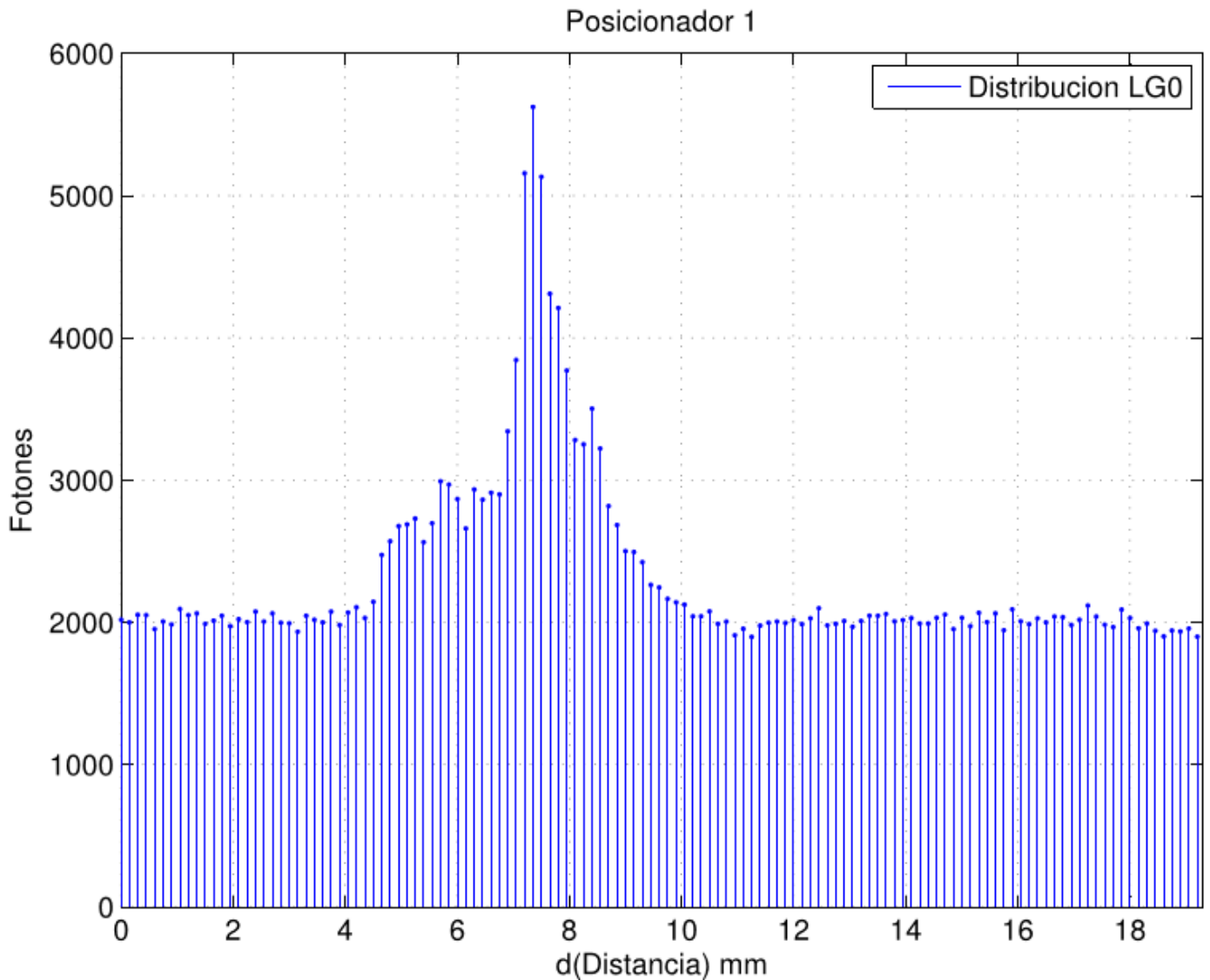


Figura 7.5. Escaneo de la distribución LG0 con el posicionador 1.

En la gráfica anterior nos dice que en algún punto del escaneo hay mayor intensidad, llegando tener hasta 5600 fotones, otra observación es que no tiene la forma gaussiana, es decir, el láser emitido debe ser gaussiana, por lo que, es un punto importante que se considera para su análisis. En la figura 7.6 se muestra una imagen donde proyecta la luz LG0 en el posicionador, La velocidad que viaja en la trayectoria vertical para el posicionador P1 es de $170 \mu\text{m/s}$. obteniendo 130 puntos en 20mm.

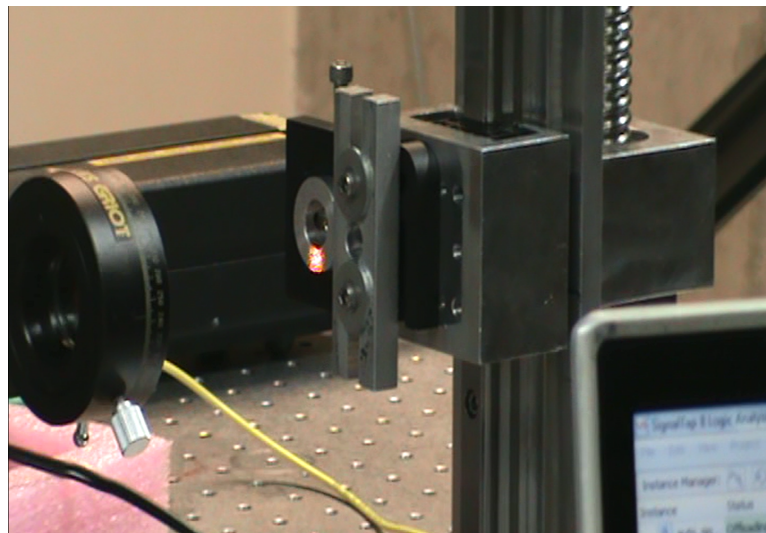
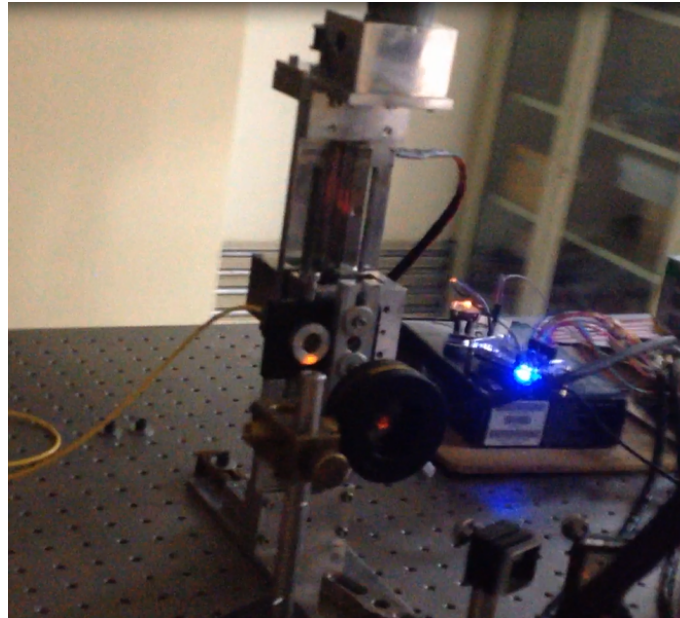


Figura 7.6. Proyección de Luz LG0.

Se desplaza el posicionador P2 en dirección z del plano cartesiano y se realiza el escaneo de la distribución $L=1$. Esta distribución es la difractada por la rejilla tipo tenedor y produce un momento angular orbital, teniendo como interferencia anillos de difracción, pasan por el atenuador y obtenemos menor intensidad y podemos medir a menor escala el conteo de fotones de LG con $l=1$, en la gráfica de la figura 7.8 se muestra el número de fotones.

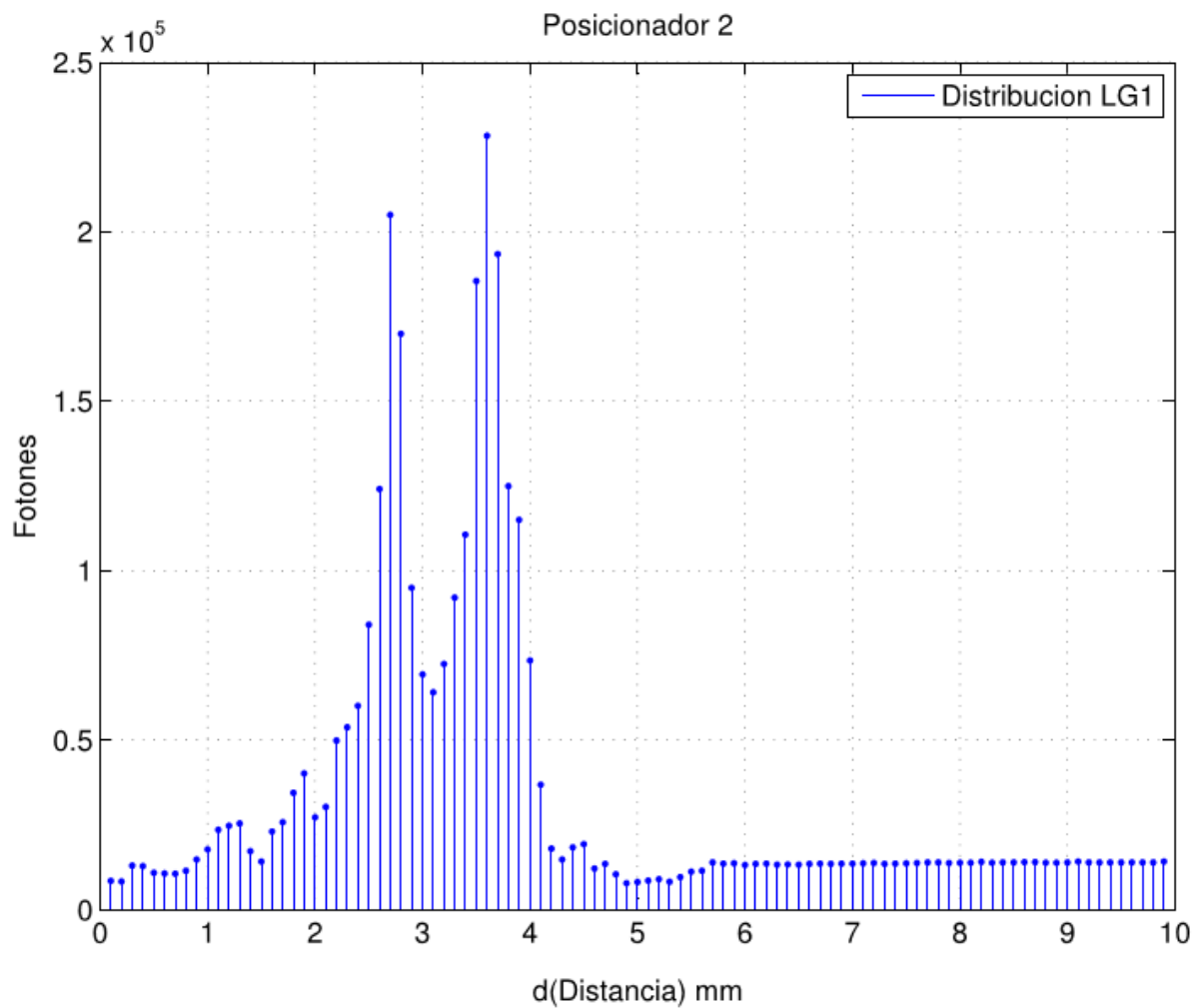


Figura 7.8. Escaneo de la distribución L=1 con el posicionador 2.

En la gráfica anterior nos dice que en algún punto del escaneo hay mayor intensidad, llegando tener hasta 240000 fotones, otra observación es que tiende a tomar la forma de anillo. En la figura 7.9 se muestra una imagen donde proyecta la luz L=1 en el posicionador P2, La velocidad que viaja en la trayectoria vertical para el posicionador P2 es de $160\mu\text{m/s}$. obteniendo 130 puntos en 10mm.

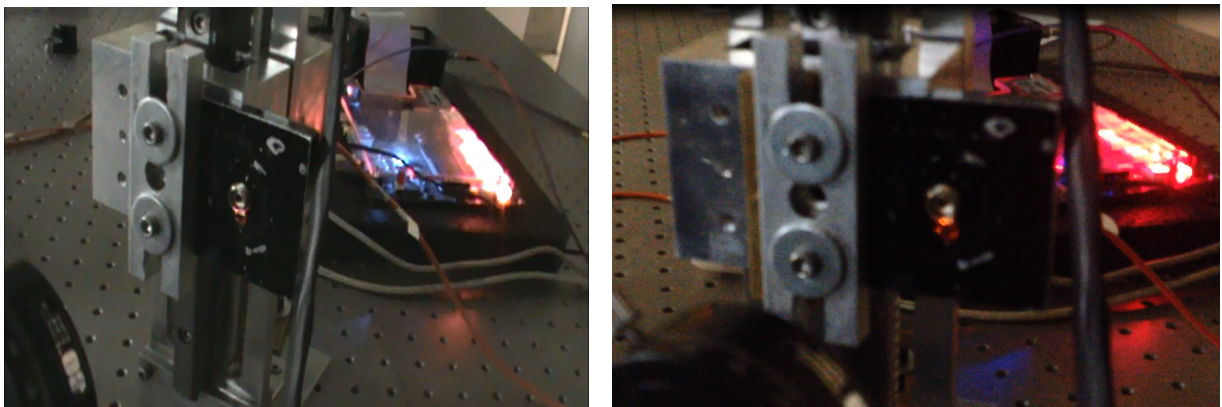


Figura 7.9. Proyección de Luz L=1

Se desplaza el posicionador P3 en dirección z del plano cartesiano y se realiza el escaneo de la distribución $L = -1$. Esta distribución es la difractada por la rejilla tipo tenedor y produce un momento angular orbital, teniendo como interferencia anillos de difracción, pasan por el atenuador y obtenemos menor intensidad y podemos medir a menor escala el conteo de fotones de LG con $l = -1$, en la gráfica de la figura 7.11 se muestra el número de fotones.

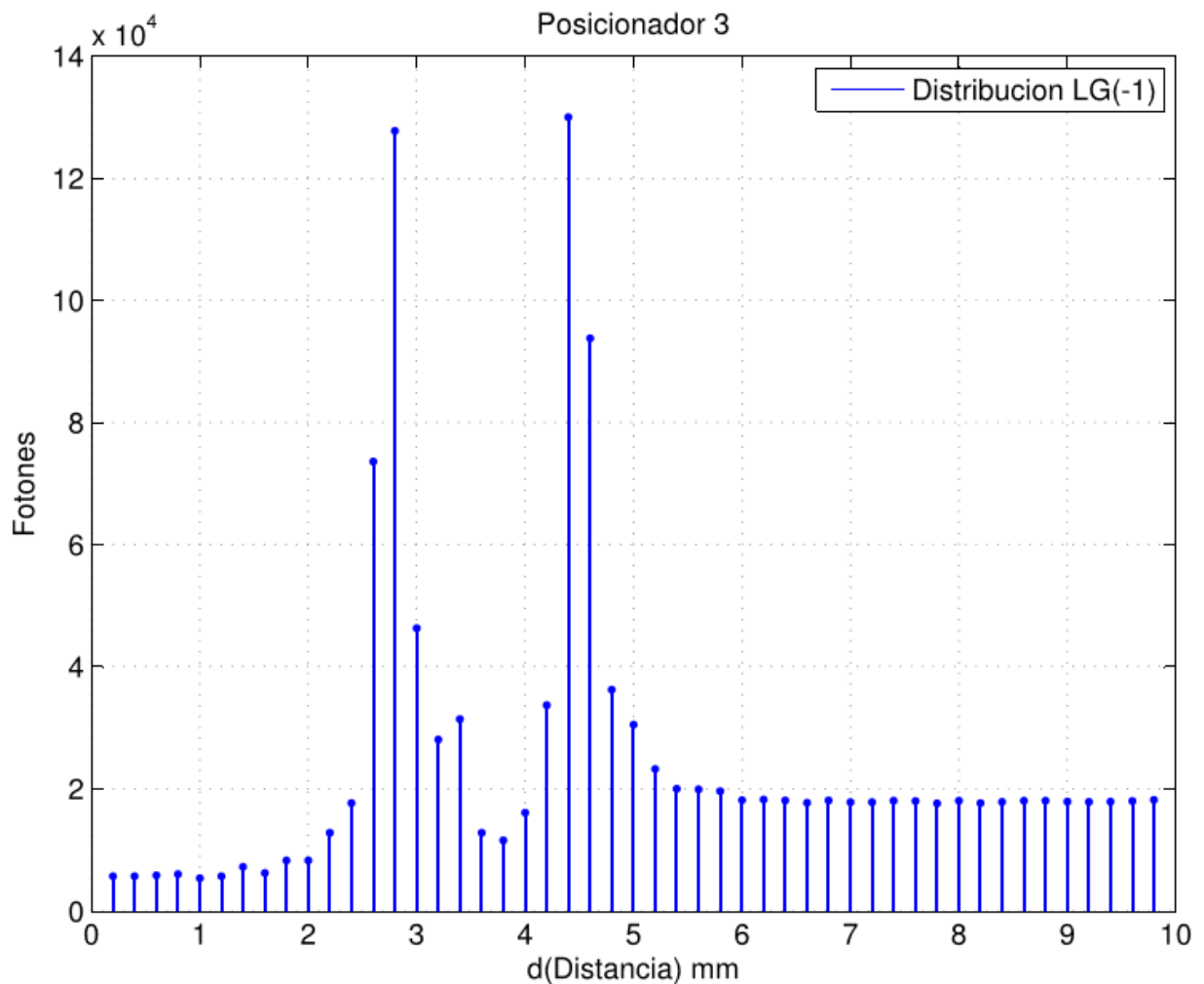


Figura 7.10. Escaneado de la distribución $L = -1$ con el posicionador 3.

En la gráfica anterior nos dice que en algún punto del escaneo hay mayor intensidad, llegando tener hasta 130000 fotones, otra observación es que tiende a tomar la forma de anillo. En la figura 7.11 se muestra una imagen donde proyecta la luz $L = -1$ en el posicionador P3. La velocidad que viaja en la trayectoria vertical para el posicionador P3 es de $285 \mu\text{m/s}$. obteniendo 50 puntos en 10mm.

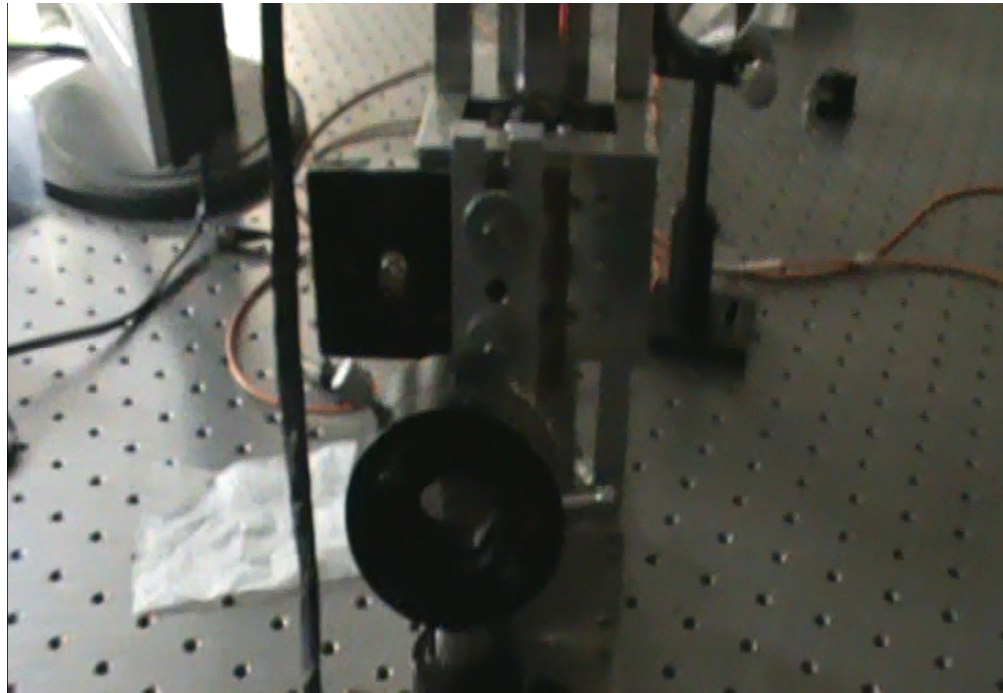


Figura 7.11. Proyección de Luz $L = -1$

7.3 Conclusiones

Con este capítulo se concluye todos los objetivos, dados los resultados solo se desea saber el funcionamiento de los robots posicionadores montados en el arreglo del experimento, para este caso solo se tomaron pruebas de un escaneo en tres distribuciones de luz con momento angular orbital, el objetivo fue realizar el conteo de fotones y encontrar el máximo número de fotones, con esto se observa que los posicionadores se mueven con una precisión excelente a lo requerido. Partiendo de la prueba anterior, los posicionadores se pueden hacer coincidencia y correlaciones de fotones con momento angular orbital que serán aplicados en un futuro.

CONCLUSIONES GENERALES

Los objetivos generales y específicos se realizaron de manera exitosa, cumpliendo cada uno de ellas conforme a lo establecido en la tesis.

Las estancias de investigación realizadas en el Laboratorio de Óptica Avanzada de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México sirvieron para montar el experimento y estudiar las partes que las componen en su arreglo Optoelectrónico y poder así darse cuenta de las necesidades para automatizarlo.

Por otra parte, se obtuvieron buenos resultados previos en forma manual, por lo tanto, una de las necesidades que se observaron es calibrar con mayor precisión el experimento para atrapar la mayor intensidad proveniente del láser, por lo que se optó por diseñar e implementar un sistema receptor automatizado para estudiar los conteos y correlación de fotones, de esta manera, fue de gran utilidad el diseño de los tres robots posicionadores de alta precisión. Con la automatización del experimento Optoelectrónico con Momento Angular Orbital, se logró diseñar y construir tres posicionadores cartesianos, su objetivo principal es moverse en el eje Z mediante rieles y tornillos de precisión, se desarrolló el modelo dinámico del sistema, ésta nos dará la precisión en el movimiento.

Debido a las características del experimento, se requirió que la resolución en el movimiento de los robots fuera de $10\mu\text{m}$, por lo tanto, se logró superar esa resolución a $1\mu\text{m}$. Al comparar con otros posicionadores en el mercado, vemos que los nuestros compiten con la mayoría de algunas empresas que se cotizaron con las mismas características, de manera general hay equipos en el mercado que supera tres veces más el costo que lo que se invirtió en nuestros tres posicionadores.

La caracterización de nuestro motor fue primordial porque predecimos que nuestro motor será óptimo en el funcionamiento, se realizaron pruebas y pudimos ver que es eficiente en 12v y posteriormente se optó por encontrar las frecuencias óptimas, con el fin de que nuestro motor pueda trabajar como un motor de transmisión directa y así lograr que su comportamiento sea lineal, tomamos como 50% del ciclo de trabajo y dadas las frecuencias se realizó la programación.

Por otra parte, el hardware es una tarjeta de control implementada para el control de los posicionadores, en ella, se encuentra la etapa de potencia, y conexiones a las entradas del FPGA, ésta tarjeta se adaptó para realizar la adquisición de datos por WIFI siendo esta la primera vez que se utiliza esta comunicación en este tipo de experimentos dentro del laboratorio de óptica avanzada de la UNAM ya que antes se empleaba el protocolo PCI para el envío y recepción de información.

Se deja el diseño de una tarjeta de propósito específico para este experimento, solo que por falta de tiempo y recursos económicos no se pudo mandar a fabricar, se tiene el diagrama electrónico y la PCB de 4 capas con sus archivos generados listos para su fabricación en un momento dado.

Por otra parte, el firmware es una parte importante en el control del sistema, ya que representa el diseño de los llamados IP Core, que son los códigos de propiedad intelectual de cualquier sistema, se diseñaron en lenguaje de programación AHDL, con el fin de controlar las posiciones, las ganancias y el torque de los motores y lograr obtener la precisión deseada de $1\mu\text{m}$, como lo muestran tanto las simulaciones en tiempo real del software de programación "Quartus II" como físicamente se pudieron medir distancias recorridas en el posicionador.

Se realizaron varias pruebas con el sistema funcionando durante varias horas y el sistema no presentó ningún problema en su funcionamiento ya que no perdió cuentas en el encoder por ruidos o algún tipo de perturbación. El firmware WiFi fue desarrollado anteriormente como tesis de Maestría, por lo que, para este proyecto se hizo la adaptación para la comunicación de los posicionadores.

Algunas aplicaciones posibles para este trabajo es la medición de fenómenos ópticos que incluyen la detección de fotones; ya sea que estos fotones se hagan atravesar un medio o medirlos directamente. Es posible aplicar el diseño de este sistema para el proceso de calibración y alineamiento del láser, como encontrar los números máximos de fotones que fue el caso previo para las pruebas del posicionador.

Finalmente, se montó los posicionadores en el experimento Optoelectrónico y se realizaron escaneos simples para ver el funcionamiento de los posicionadores, por lo que, se obtuvieron los máximos de conteos de fotones de las distribuciones de luz con Momento Angular Orbital.

Hasta el momento tenemos control de velocidad, Par aplicado, y posición de $1\mu\text{m}$, lo que seguiría es controlar automáticamente a pasos de $1\mu\text{m}$, de $10\mu\text{m}$ o $100\mu\text{m}$ a una distancia finita en un determinado tiempo. Por otra parte, los robots diseñados actualmente es de 1GDL (eje Z), por lo que están adaptados y diseñados para montar posicionadores o piezoeléctricos con dimensiones hasta $10\times 10\text{cm}$ para los ejes X, Y por cada robot.

Tenemos la escritura de datos por WiFi en donde solo enviamos posiciones deseadas y ganancias, lo que se puede hacer en los siguientes temas de tesis es leer los datos del procesamiento del FPGA como las posiciones, ganancias, Par y velocidad por WiFi y ver su comportamiento en tiempo real en Labview.

El firmware del sistema es amigable para la adaptación de otros grados de libertad, es decir, por cada motor que se anexe al sistema, el proceso de programación es casi lo mismo. En el experimento con MAO se puede adaptar para cualquier tipo de pruebas, por ejemplo, una necesidad en el experimento es hacer un escaneo

matricial en las distribuciones con Momento Angular Orbital, así se podría encontrar más correlación y obtener resultados precisos y visualizar de cerca el comportamiento del fenómeno.

Con este trabajo de tesis se deja la infraestructura para este tipo de experimentos contribuyendo así al desarrollo de tecnología aplicada al área de óptica cuántica, señalando que con este desarrollo se puede contribuir al conocimiento pues resultados de estos experimentos pueden ser publicados en revistas internacionales y ayudar a la difusión de este tipo de teorías.

Los resultados de este trabajo de tesis fueron publicados dos artículos internacionales y dos ponencias en el Congreso Internacional sobre Innovación y desarrollo tecnológico (CIINDET 2015), y congreso Internacional de Ingeniería (CONIIN 2015), y una publicación en poster en el LVIII Congreso Nacional de Física y Congreso Latinoamericano de Física 2015.

REFERENCIAS

- [1] De Icaza Y.A. Fotonos de conversión paramétrica descendente. UNAM, México, 2007.
- [2] Lord J.W. and Beck M. *Coincidence Counting Unit Using the Altera DE2*. Department of Physics, Whitman College, Walla Walla, Washington 99362, USA, 2007.
- [3] PerkinElmer Optoelectronics. www.optoelectronics.perkinelmer.com. PerkinElmer Inc., 1998-2012, Consultado en Abril de 2012.
- [4] Laser Components. www.lasercomponents.com. Laser Components USA, Inc., 2012, Consultado en Abril de 2012.
- [5] Excelitas Technologies. www.excelitas.com. Excelitas Technologies Corp., 1931-2012, Consultado en Abril de 2012.
- [6] ID Quantique SA. www.idquantique.com. ID Quantique SA, 2012, Consultado en Abril de 2012.
- [7] Lord J.W. and Beck M. *Coincidence Counting Unit Using the Altera DE2*. Department of Physics, Whitman College, Walla Walla, Washington 99362, USA, 2007.
- [8] Vergara S., Vargas M.A., Paic G., Tejeda G., Fernandez A., León I., Reyes F., and Villasenor L. *Characterization of the ACORDE scintillator counters using a PCI electronic card*, volume 53 (2) 120-125. Revista Mexicana de Física, México, Abril 2007.
- [9] J. D. Jackson Classical Electrodynamics, John Wiley & Sons Inc., 1999.
- [10] E. J. Galvez, Gaussian beams in the optics course, American Association of Physics Teachers, 74, 2006, 355-361.
- [11] D. L. Andrews, Structured Light and Its Applications: An Introduction to Phase- Structured Beams and Nanoscale Optical Forces, Academic Press, 2008.
- [12] M. W. Beijersbergen, L. Allen, H. Van der Veen and J. P. Woerdman, Asigmatic laser mode converters and transfer of orbital angular momentum Opt. Commun., 96, 1993, 123-132.
- [13] M. Padgett, J. Courtial and L. Allen, Light's Orbital Angular Momentum, Phys. Today, 57, 2004, 35-40.
- [14] L. Allen, M. W. Beijersbergen, R. J. C. Spreeuw, and J. P. Woerdman Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes, Phys. Rev., 45, 1992, 8185-8189.

- [15] M. W. Beijersbergen, L. Allen, H. Van der Veen and J. P. Woerdman, Asigmatic laser mode converters and transfer of orbital angular momentum *Opt. Commun.*, 96, 1993, 123-132.
- [16] M. Padgett, J. Courtial and L. Allen, Light's Orbital Angular Momentum, *Phys. Today*, 57, 2004, 35-40.
- [17] E. Yao, S. Franke-Arnold, J. Courtial and M. J. Padgett, Observation of quantum entanglement using spatial light modulators, *Optics Express*, 14, 2006, 1389-13094.
- [18] J. Arlt, K. Dholakia, L. Allen and M.J.Padgett, The production of multiringed Laguerre-Gaussian modes by computer-generated holograms, *J. of Mod. Opt.*, 45, 1998, 1231-1237.
- [19] De Icaza Y.A. Fotonos de conversión paramétrica descendente. UNAM, México, 2007.
- [20] SPCM-AQ4C Interface board connections, disponible en: www.optoelectronics.perkinelmer.com
- [21] SPCM-AQ4C Data Sheet, disponible en: www.optoelectronics.perkinelmer.com
- [22] SPCM-AQ4C Interface board connections, disponible en: www.optoelectronics.perkinelmer.com
- [23] Fernando Reyes Cortes, Robótica control de robots manipuladores, alfa omega, 1er edición.
- [24] Josep Balcells, José Luis Romeral, Autómatas Programables, marcombo, 1997.
- [25] Roving Networks Inc., WiFly Command Reference, Advanced Features & Applications User's Guide, Version 1.1r 3/27/13.
- [26] Reese, Robert, Microprocessors from assembly language to C using the PIC18Fxx2, Charles River Media, 2005, pags. 260-263.

PUBLICACION DE RESULTADOS

Artículo publicado CIINDET 2015.



CIINDET 2015

*XII Congreso Internacional sobre Innovación y Desarrollo Tecnológico,
25 al 27 de marzo, Cuernavaca Morelos, México.*

Automatización de la producción, interferencia y enredamiento de luz con momento angular orbital para aplicaciones en comunicaciones Ópticas.

J. López Gómez, M.A. Vargas Treviño, V.M. Velázquez Aguilar, F. Reyes Cortez, S. Vergara Limón.

Resumen: Históricamente la automatización ha mejorado e incrementado considerablemente no solo en la producción industrial, sino también está presente en la realización de experimentos científicos como parte de la enseñanza así como la investigación. El objetivo de este trabajo consiste en el estudio de la producción de fotones individuales con momento angular orbital (MAO), la interferencia cuántica de fotones con momento angular orbital y su distribución espacial (enredamiento espacial) con momento angular orbital, y su automatización del experimento que se realizan en la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México (FC-UNAM). El experimento consiste en un arreglo optoelectrónico, del cual es generar haces Leguerre-Gauss (LG) a través de hologramas (o rejillas de difracción) producidos por computadora, cuando ésta rejilla se ilumina con un haz de ondas planas se genera, a primer orden, el patrón de intensidad y fase que se requiere, en particular, para producir los modos Leguerre-Gauss (LG) se requiere una rejilla de tenedor. Este trabajo presenta el diseño, desarrollo e implementación de un sistema de adquisición de datos (SAD) por WiFi, el cual consiste de hardware, firmware y software de aplicación y construir un sistema de detección con eficiencia cuántica para estudiar los conteos y correlaciones espaciales de fotones con diferente momento angular. Así mismo, diseñar e implementar tres robots cartesianos que se mueva de 100 $\mu\text{m}/\text{seg}$. en el eje x, z.

Jesús López Gómez, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Av. san Claudio y 18 Sur, Ciudad Universitaria, México, jesuslopez_meca@hotmail.com.
María Aurora Dozcoeca Vargas Treviño, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Av. san Claudio y 18 Sur, Ciudad Universitaria, México, mvargas@ccc.huap.mx.
Victor Manuel Velázquez Aguirre, Universidad Nacional Autónoma de México, Av. Universidad N° 3000, Ciudad Universitaria, Distrito Federal, México, vicvela@ciencias.unam.mx.
Fernando Reyes Cortez, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Av. san Claudio y 18 Sur, Ciudad Universitaria, México, rec82@gmail.com.
Sergio Vergara Limón, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Av. san Claudio y 18 Sur, Ciudad Universitaria, México, svergara@ccc.huap.mx.

Abstract: Historically, automation has improved and increased considerably not only in industrial production, but is also present in conducting scientific experiments as part of teaching and research. The aim of this work is the study of the production of single photons with orbital angular momentum (MAO), quantum interference of photons with orbital angular momentum and their spatial distribution (spatial entanglement) with orbital angular momentum, and automation of the experiment carried out in the Faculty of Science at the National Autonomous University of Mexico (FC-UNAM). The experiment consists of an optoelectronic arrangement, which is generating beams Leguerre-Gauss (LG) via holograms (or gratings of diffraction) produced by computer, when this grating is illuminated with a beam of plane waves is generated, a first order the intensity and phase pattern that is required, in particular, to produce a grid Leguerre-Gauss (LG) a fork grating is required. This paper presents the design, development and implementation of a data acquisition system (SAD) by WiFi, which consists of hardware, firmware and application software and build a detection system to study quantum efficiency counts and spatial correlations of photons with different angular momenta. Also, design and implement three Cartesian robots with move of 100 $\mu\text{m} / \text{sec}$. in the x, z axes.

Keywords: Física cuántica, Óptica cuántica, Momento Angular Orbital, Diseño electrónico, Diseño mecánico, WiFi, FPGA, Sistema de adquisición de datos, control, Robótica, programación AHDL.

Introducción

La manipulación de fotones y átomos individuales representa un avance tecnológico con muchas promesas de aplicaciones en comunicaciones e información. La base de ésta tecnología es el aprovechamiento de la información codificada en las componentes cuánticas de éstos entes individuales. Así fenómenos como interferencia cuántica y enredamiento cuántico son conceptos que no tienen una contraparte clásica, por



La Sección Morelos del Instituto de Ingenieros en Electricidad y en Electrónica
Otorga la presente

Constancia

A

Jesús López Gómez

Por su participación como

CONGRESISTA

Durante el XII Congreso Internacional sobre Innovación
y Desarrollo Tecnológico, realizado del 25 al 27 de marzo del 2015,
en la ciudad de Cuernavaca, Morelos, México.



Dr. Francisco Ponce Maldonado
Presidente IFEF Carricón Mivaltae



Dr. Rafael Castellanos Bustamante
Presidente del Círculo 2015





CONSTANCIA

Artículo: *“Automatización de la producción, interferencia y enredamiento de luz con momento angular orbital para aplicaciones en comunicaciones Ópticas”*

Autores: **Jesús López Gómez, María Aurora Diozcora Vargas Treviño, Víctor Manuel Velázquez Aguilar, Fernando Reyes Cortés, Sergio Vergara Limón**

Id. artículo: **59**

Área: **Mecatrónica**

El Comité Técnico del XII Congreso Internacional Sobre Innovación y Desarrollo Tecnológico CIINDET 2015, que se llevó a cabo en la ciudad de Cuernavaca, Morelos, México, del 25 al 27 de marzo de 2015, hace constar que el artículo citado fue presentado de acuerdo con el programa técnico del congreso e incluido en las memorias del mismo.


La presente constancia se expide para los fines legales que a los autores convengan.

Cuernavaca, Morelos, México a 27 de Marzo de 2015.



Atentamente




Dr. Jorge Guillermo Calderón Guizar
Presidente del Comité Técnico CIINDET 2015

CONIIN 2015

Automation of optoelectronic experiment of the Production of light, Interference, and Quantum entanglement with Orbital Angular Momentum for applications in Optical communications

Jesús López Gómez¹, M. Aurora Vargas Treviño², V. Manuel Velázquez Aguilar³, Sergio Vergara Limon⁴

Facultad de Ciencias de la Electrónica-Maestría en Ciencias de la Electrónica Opción Automatización, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Ave. San Claudio y 18 Sur, building 109A, Ciudad Universitaria City Puebla, Puebla, Country México

¹ jesuslopez_meca@hotmail.com

² auroravargast@hotmail.com

⁴ svergara@ece.buap.mx

Facultad de Ciencias- Laboratorio de Óptica Avanzada, Universidad Nacional Autónoma de México

Ave. Universidad No.3000, Circuito Exterior S/N, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, Distrito Federal, City México, Country México

³ vicvela@ciencias.unam.mx

Abstract— The automation has improved and increased considerably not only in industrial production, but is also present in conducting scientific experiments as part of teaching and research. The aim of this work is the study of the production of single photons with orbital angular momentum (MAO), quantum interference of photons with orbital angular momentum and their spatial distribution (spatial entanglement) with orbital angular momentum. The electronic project is to produce this type of patterns in an automated manner and build a detection system with quantum efficiency for studying counts and spatial correlations of photons with different angular momenta. With an array of five detectors, we are obtained five electrical signals -2, -1, 0, +1, +2, and we could analyze the photon correlations with orbital angular momentum. Moreover, the study of these photons with MAO involves trying to understand how a particle can propagate with a certain helicity and not a wave. The experiment consists of an optoelectronic arrangement, which is generating beams Laguerre-Gauss (LG) via holograms (or gratings of diffraction) produced by computer, when this grating is illuminated with a beam of plane waves is generated, a first order the intensity and phase pattern that is required, in particular, to produce a grid Laguerre-Gauss (LG) a fork grating is required. This paper presents the design, development and implementation of a data acquisition system (SAD) via Wi-Fi, which consists of hardware, firmware and application software and characterize a detection system with quantum efficiency and to study counts and spatial correlations of photons with different Orbital Angular Momentum. Also, design and implement three Cartesian robots linear and also using in the axis X a piezoelectric motor with high accuracy.

Keywords— *Quantum optics, Orbital Angular Momentum, Electronic design, mechanical engineering, Software & Hardware, Wi-Fi, FPGA, AHDL programming, system data acquisition, control, robotics, Mechatronics.*

I. INTRODUCTION

The manipulation of individual atoms and photons represents a technological breakthrough with many promises of applications in communications and information. The basis of this technology is the use of the information encoded in the quantum components of these individual entangled photons. So phenomena such as quantum interference and quantum entanglement are concepts that have no classical counterpart, therefore, is very important to understand and manipulate them to their best advantage. In the lab of quantum optics of the Faculty of Sciences of the UNAM, various research experiments are performed, these experiments are complex and it can take several weeks or even months to take the data and then do your analysis. Basically, the experiments consist in the study of the photon correlations properties: frequency, polarization, time, detection position, orbital angular momentum. For these experiments, it is essential to have a source of single photons. Such technology involves the use of quantum phenomena such as quantum entanglement. The entanglement can be used for the quantum encryption information, quantum computing, quantum microlithography, among other applications. For the test correlation of photons we used a beam splitter that only has two options of directionality (transmitted and reflected). In contrast, production of photons with Orbital Angular Momentum, the directionality depends directly on the burden

11° CONGRESO
INTERNACIONAL DE INGENIERÍA
11-15 MAYO 2015
QUERÉTARO, MÉXICO



La UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
a través de la
FACULTAD DE INGENIERÍA,
otorga la presente

CONSTANCIA

a

Jesús López Gómez, M. Aurora Vargas Treviño, V. Manuel Velázquez
Aguilar, Fernando Reyes Cortes, Sergio Vergara Limón

Por haber impartido la ponencia oral

*Automation of optoelectronic experiment of the Production of
light, Interference, and Quantum entanglement with Orbital
Angular Momentum for applications in Optical communications*

en el Congreso Internacional de Ingeniería
en su undécima edición
realizado del 11 al 15 de Mayo del 2015
en la ciudad de Santiago de Querétaro, México.

Dr. Aurelio Domínguez González
Director



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA DE
QUERÉTARO

creando**conciencia**

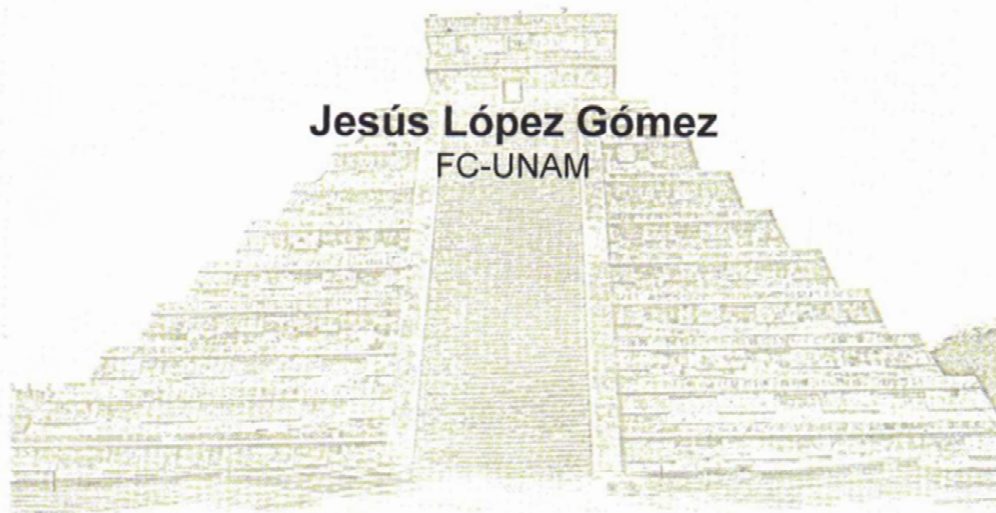


LA SOCIEDAD MEXICANA DE FÍSICA



Agradece la asistencia y participación de:

Jesús López Gómez
FC-UNAM



en el

**LVIII Congreso Nacional de Física y
Congreso Latinoamericano de Física 2015**

del 5 al 9 de octubre de 2015
Hoteles Fiesta Americana y Holiday Inn
Mérida, Yucatán

Dra. Estela Susana Lizano Soberón
Presidenta de la SMF