

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

TESIS DE MAESTRÍA

Método Teórico para Aumento de la Estabilidad de Velocidad del
Motor DC para Mejor Resolución del Mapeo Continuo en un
Sistema de Barrido Láser Tridimensional

Autor:

César Antonio Sepúlveda Valdez

Director de Tesis:

Dr. Oleg Sergiyenko

Co-Director de Tesis:

*Dr. Julio César Rodríguez
Quiñonez*

*Una tesis presentada en cumplimiento de los requisitos
para el grado de Maestro en Ingeniería
en el*

Instituto de Ingeniería
Campus Mexicali

26 de junio de 2020



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE BAJA CALIFORNIA**

INSTITUTO DE INGENIERÍA
MEXICALI

Declaración de Autoría

Yo, César Antonio Sepúlveda Valdez, declaro que esta tesis titulada, “Método Teórico para Aumento de la Estabilidad de Velocidad del Motor DC para Mejor Resolución del Mapeo Continuo en un Sistema de Barrido Láser Tridimensional” y el trabajo presentado en ella es mío. Confirmando que este trabajo enviado para evaluación es mío y se expresa en mis propias palabras. Cualquier uso que se haga dentro de las obras de otros autores en cualquier forma (por ejemplo, ideas, ecuaciones, figuras, texto, tablas, programas) se reconoce adecuadamente en cualquier momento de su uso. Se incluye una lista de las referencias empleadas.

Firma:

Fecha:

“Somos lo que hacemos de forma repetida. La excelencia, entonces, no es un acto, sino un hábito.”

Aristóteles

Resumen

Instituto de Ingeniería

Campus Mexicali

Maestro en Ingeniería.

Método Teórico para Aumento de la Estabilidad de Velocidad del Motor DC para Mejor Resolución del Mapeo Continuo en un Sistema de Barrido Láser Tridimensional

por César Antonio Sepúlveda Valdez

En este trabajo de tesis de maestría se presenta una propuesta para el incremento en la estabilidad de barrido del Sistema de Visión Técnica (TVS por sus siglas en inglés) presente en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC) generando un aumento en la resolución y precisión de las mediciones tomadas por el mismo. Se centra en algunas de las principales fuentes de incertidumbre que existen en la implementación del escáner láser mencionado (TVS) y principalmente en su elemento pasivo. Al analizar la señal procesada en diferentes condiciones ambientales y determinar los problemas por la inestabilidad de la operación de un motor con escobillas de corriente continua (DC por sus siglas en inglés), se propone el esquema de control de lazo cerrado para reducir los problemas de rendimiento y se realiza experimentación para demostrar los resultados obtenidos con el método propuesto. Además, se propone una herramienta geométrica para la comparación de los resultados obtenidos en las mediciones de los distintos prototipos del TVS.

Reconocimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por brindar el apoyo tanto económico como material para financiar la investigación y el trabajo, y al constante apoyo con becas para poder continuar con los estudios de posgrados en México y en el extranjero.

A la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), por darme la oportunidad de estudiar mi posgrado, y poder obtener mí grado en Maestría en Ingeniería.

Al Instituto de Ingeniería de la UABC campus Mexicali, por brindar las aulas, los espacios y a los catedráticos en la formación académica de los estudiantes de posgrado.

A mi director de tesis, Dr. Oleg Sergiyenko, por generar este proyecto de investigación y permitirme participar en él, compartiendo su conocimiento respecto al campo de estudio y su experiencia.

A mi codirector de tesis, Dr. Julio César Rodríguez Quiñonez, por trabajar en cooperación con el Dr. Oleg Sergiyenko en este proyecto de investigación, por su tiempo y consejos durante el proyecto.

A mis compañeros por apoyarme en los diferentes proyectos y trabajos que surgieron durante este tiempo de estudio. Sus consejos y puntos de vista me ayudaron avanzar en mi trabajo.

Índice General

Declaración de Autoría.....	II
Resumen	IV
Reconocimientos.....	V
Índice General.....	VI
Índice de Figuras.....	VIII
Índice de Tablas	X
Siglas	XI
Símbolos	XII
1. Introducción.....	1
1.1. Antecedentes	2
1.1.1. Sistema de Visión Técnica	3
1.1.2. Controladores para motores DC	5
1.2. Planteamiento del problema.....	7
1.3. Justificación y uso de resultados	8
1.4. Objetivos de la investigación	9
1.4.1. Objetivo general.....	9
1.4.2. Objetivos específicos	10
1.5. Hipótesis	11
2. Marco Teórico.....	13

2.1.	Escáner láser basado en triangulación dinámica	15
2.1.1.	Apertura de Escaneo	16
2.2.	Triangulación dinámica	17
2.3.	Señales del TVS	20
2.4.	La geometría del sistema	22
2.5.	La máquina eléctrica DC	33
2.6.	Control del motor DC	38
2.6.1.	Modulación de ancho de pulso	41
3.	Procedimiento de Investigación (metodología)	43
3.1.	Elaboración de la metodología de control	43
3.2.	Análisis de la señal	50
4.	Análisis de los resultados	77
5.	Conclusiones	87
6.	Trabajos futuros	91
7.	Bibliografía y referencias	92
8.	Anexos	98

Índice de Figuras

Figura 2.1 Sistema de Visión Técnica (TVS).....	16
Figura 2.2. Apertura de Escaneo (Scanning Aperture-SA).....	17
Figura 2.3. Principio de triangulación dinámica (vista superior).....	18
Figura 2.4. Triangulación dinámica (vista lateral).....	19
Figura 2.5. Conversión a voltaje de la luz de láser reflejada. Señal de recepción.....	21
Figura 2.6. Señales fotoeléctricas del sistema.....	21
Figura 2.7. Plano del espejo.....	24
Figura 2.8. Vista superior de la elipse formada por el corte de 45° del espejo.....	26
Figura 2.9. Representación gráfica de los puntos definidos.....	27
Figura 2.10. Representación gráfica de los vectores que generan el plano.....	30
Figura 2.11. El motor DC.....	34
Figura 2.12 Partes del motor.....	35
Figura 2.13. Circuito eléctrico del motor DC.....	36
Figura 2.14. Diagrama de bloques controlador PID.....	39
Figura 2.15. Método de ajuste Ziegler-Nichols.....	40
Figura 2.16. Ciclos de trabajo del PWM.....	42
Figura 3.1. Opto-acoplador.....	45
Figura 3.2. Diagrama de bloques del esquema de control en lazo cerrado.....	46
Figura 3.3. DAQ USB-1208LS de Measurement Computing, para adquisición de la señal de opto acoplador.....	47
Figura 3.4. Puente H, utilizado como etapa de potencia.....	48
Figura 3.5. Circuito de control para la apertura.....	49
Figura 3.6. Señal de detección a la velocidad más lenta posible del sistema, a) primer periodo, b) segundo periodo, c) tercer periodo.....	51
Figura 3.7. Velocidad angular de la Apertura de Escaneo durante experimentación.....	52
Figura 3.8. Variación en el ángulo β_{ij} calculado por el TVS por efectos de la inestabilidad.....	53
Figura 3.9. Distribución de los datos, medición de distancia en coordenada x	54
Figura 3.10. Distribución de los datos, medición de distancia en coordenada y	55
Figura 3.11. Error absoluto en las mediciones (obtenido gracias a implementación de ecuación de plano de barrido).....	55
Figura 3.12. SA a la más baja velocidad posible, primer periodo de detección.....	57
Figura 3.13. SA a la más baja velocidad posible, segundo periodo de detección.....	57
Figura 3.14. SA a la más baja velocidad posible, tercer periodo de detección.....	58
Figura 3.15. Periodos de la señal de detección con aislamiento del sistema de la luz de día.....	59
Figura 3.16. Señal de detección con velocidad aumentada.....	60
Figura 3.17. Osciloscopio TBS2000 Series, utilizado en las pruebas de laboratorio.....	62

Figura 3.18. Captura de pantalla de osciloscopio. Señales medidas: Sensor Zero-Amarrillo, Stop Sensor-Azul.	64
Figura 3.19. Representación gráfica de generación de la tabla importada.	65
Figura 3.20. Pantalla completa Matlab.....	66
Figura 3.21. Captura de pantalla de Editor en Matlab – Programa: Final.m.....	67
Figura 3.22. Sección current folder-Matlab.....	68
Figura 3.23. Workspace Final.m.....	69
Figura 3.24. Guardado de datos en matriz ‘mopto’.	70
Figura 3.25. Columna de tiempo iniciada a 0.	71
Figura 3.26. Menor valor de la señal.	72
Figura 4.1. Velocidad del motor en experimentación con controlador.....	78
Figura 4.2 Ángulo de recepción β_{ij} calculado por el TVS operado con el controlador....	79
Figura 4.3. Distancia calculada en x por el TVS operando con el esquema de control.....	80
Figura 4.4. Distancia calculada en y por el TVS operando con el esquema de control.....	81
Figura 4.5. Distribución de error absoluto en las mediciones.	82
Figura 4.6. Comparación en los periodos de la señal. Funcionamiento con controlador y sin controlador.	83
Figura 4.7. Error angular desde la perspectiva de la SA.	84

Índice de Tablas

Tabla 1. Método Ziegler-Nichols de sintonización de ganancias.	40
Tabla 2. Ejemplo de tabla importada a USB con osciloscopio.	63
Tabla 3. Error angular en coordenadas geométricas.	85

Siglas

CC. Corriente Continua

CONACYT. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

CSV. Comma-Separated Values (Valores Separados por Coma)

DC. Direct Current (Corriente Directa)

DSP. Digital Signal Processor (Procesador Digital de Señales)

FOV. Field of View (Campo de Visión)

LIDAR. Light Imaging Detection and Ranging

MCU. Movimiento Circular Uniforme

PID. Proporcional, Integral, Derivativo

PL. Positioning Laser (Posicionador Láser)

PWM. Pulse Width Modulation (Modulación por Ancho de Pulso)

SA. Scanning Aperture (Apertura de Escaneo)

TOF. Time-of-flight (Tiempo de vuelo)

TVS. Sistema de Visión Técnica

UABC. Universidad Autónoma de Baja California

VI. Virtual Instrument (Instrumento Virtual)

Símbolos

Símbolo	Nombre	Unidad de Medición
A	Punto de Reflexión	-
γ	Ángulo de Emisión	Grados °
β	Ángulo de Recepción	Grados °
a	Distancia de separación entre SA y LP	Metros - m
d	Distancia del TVS al Punto de Reflexión	Metros - m
p	Distancia en eje y de SA a Punto de Reflexión	Metros - m
q	Distancia en eje y de LP a Punto de Reflexión	Metros - m
η	Ángulo de Inclinación del TVS	Grados °
h	Altura del Punto de Reflexión	Metros - m
d'	Proyección de d en suelo cuando el TVS presenta inclinación	Metros - m
β_{ij}	Ángulo de recepción para un escaneo 3D completo	Grados °
$N_{2\pi}$	Número de pulsos contados de la frecuencia de referencia para una rotación del motor DC	-
N_A	Número de pulsos desde Sensor Zero hasta Stop Sensor.	-
f_P	Frecuencia de referencia	Hertz - Hz
O''	Sistema Cartesiano de Referencia con origen en espejo de SA	-
Π	Plano de Barrido	-
a_p	Constante del plano de barrido para x	-
b_p	Constante del plano de barrido para y	-
c_p	Constante del plano de barrido para z	-
d_p	Constante del plano de barrido	-
Π_A	Coordenadas de A evaluadas en la ecuación del plano.	-

x_A	Coordenada en x del Punto de Reflexión	Metros - m
y_A	Coordenada en y del Punto de Reflexión	Metros - m
z_A	Coordenada en z del Punto de Reflexión	Metros - m
M	Plano del Espejo	-
e_1	Punto 1 en el espejo	-
e_2	Punto 2 en el espejo	-
e_3	Punto 3 en el espejo	-
e_2OA	Triángulo formado por el punto e_2 , y el origen del Sistema de Referencia en el plano yz	-
y_{side}	Proyección del vector posición del punto e_2	Metros - m
\vec{e}_{2y}	Proyección del vector posición del punto e_2 en y	Metros - m
z_{side}	Proyección del vector posición del punto e_2	Metros - m
\vec{e}_{2z}	Proyección del vector posición del punto e_2 en z	Metros - m
$\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$	Vectores unitarios del Espacio Cartesiano	-
$\hat{x}', \hat{y}', \hat{z}'$	Vectores unitarios del Espacio Cartesiano en rotación	-
a_2, b_2, c_2	Constantes que definen el punto e_2	-
d_3, e_3, f_3	Constantes que definen el punto e_3	-
g_1, h_1, i_1	Constantes que definen el punto e_1	-
\vec{n}_m	Vector normal al plano de espejo	-
\vec{e}_1e_2	Vector desde e_1 a e_2 , encontrado en el plano del espejo	-
\vec{e}_1e_3	Vector desde e_1 a e_3 , encontrado en el plano del espejo	-
$T_{x,y,z}$	Punto auxiliar para definir ecuación del plano	-
$\vec{e}_1T_{x,y,z}$	Vector desde e_1 a $T_{x,y,z}$	-
x_T, y_T, z_T	Coordenadas cartesianas de punto $T_{x,y,z}$	-

\vec{g}	Vector de Fuerza de Gravedad	Metros por segundo al cuadrado - m/s^2
α	Plano Auxiliar	-
\in	Pertenencia a un conjunto	-
\perp	Perpendicularidad	-
P	Punto que define plano α	-
\vec{v}_1, \vec{v}_2	Vectores usados para definir plano α	-
\cap	Intersección de dos conjuntos	-
\vec{P}_g	Intersección de α con \vec{n}_m	-
$u_{cc}(t)$	Fuente de alimentación del motor DC	Volts - V
$u_{EMF}(t)$	Fuerza Electromotriz	Volts - V
$\omega(t)$	Velocidad angular del motor DC	Hertz – Hz, rps (revoluciones por segundo), rpm (revoluciones por minuto)
k_u	Constante electromotriz del motor DC	-
R	Resistencia de armadura del motor DC	Ohms - Ω
L	Impedancia de Armadura motor DC	Henries - H
$y_\theta(t)$	Posición angular del eje del motor DC	Grados $^\circ$
$I(t)$	Corriente inducida en la armadura del motor DC	Amperes - A
$T(t)$	Par o momento del motor DC	Newton por metro - $N.m$
k_T	Constante de torque del motor DC	-
μ	Coficiente de viscosidad del motor DC	-
J	Momento de Inercia del motor DC	-
$u(t)$	Salida de control	-
$e(t)$	Error del lazo de control	-
K_P	Constante Proporcional	-
T_I	Constante de Tiempo Integral del controlador	Segundos – s
T_D	Constante de Tiempo Derivativo del controlador	Segundos – s
$r(t)$	Señal de Entrada planta de control	-

$y(t)$	Señal de Salida planta de control	-
K	Paso al que se lleva la respuesta de la planta	-
L_c	Tiempo de retardo del controlador	Segundos – s
T_c	Constante de tiempo de controlador	Segundos – s
θ_e	Error angular en la medición	Grados $^\circ$
$\angle ASAB$	Ángulo de error a 1 m	Grados $^\circ$
$\angle CSAD$	Ángulo de error a 10 m	Grados $^\circ$
X_{1m}	Error en la medición a 1m de distancia	Metros - m
X_{10m}	Error en la medición a 10m de distancia	Metros - m
X_{sd}	Error a Distancia de escaneo	Metros - m

Con todo mi cariño y mi amor a las personas que hicieron todo en la vida para que pudiera lograr mis sueños, mis metas y darme la mano cuando sentía que el camino no tenía fin. Por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad; muchos de los logros se los debo a ustedes, en los que incluyo este. Me formaron con reglas y ciertas libertades, pero al final de cuentas, me motivaron con constancia para alcanzar mis anhelos.

A ustedes por siempre mi agradecimiento de todo corazón

1. Introducción

Mediante el desarrollo de esta investigación se pretende mejorar el proceso de adquisición de la información, resolución y la precisión de las mediciones obtenidas por el sistema de posicionamiento tridimensional de barrido láser mediante triangulación dinámica que se encuentra en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California.

El sistema está constituido por dos partes principales, un Posicionador Láser (PL, por sus siglas en inglés) el cual emite una señal, que al ser reflejada en un cuerpo (punto del que se tomará la coordenada espacial) es recibida por la segunda parte del sistema llamada Apertura de Escaneo (SA, por sus siglas en inglés) para así generar triángulos y mediante ley de senos determinar la posición del punto en el cual se reflejó el láser. Ambas partes del sistema controladas por motores de Corriente Directa o DC (por sus siglas en inglés).

El proyecto comprende varias etapas: investigación sobre motores DC y sus principales características y ventajas, investigación sobre los métodos de control para motores DC, elección de la mejor metodología de estabilización de la velocidad del motor en la Apertura de Escaneo, diseño del sistema de control adecuado y experimentación. Con el objetivo de disminuir el error en las mediciones y determinar el grado de mejora a la operación del sistema. La aportación más relevante será el aumento en la resolución y precisión de las mediciones obtenidas por el sistema para poder garantizar el funcionamiento óptimo de este en las condiciones cambiantes para cualquier aplicación requerida, como ejemplo las mencionadas en la sección 1.1.1 de este trabajo.

1.1. Antecedentes

A fin de establecer la evolución cronológica de la temática relacionada con el escáner láser, el control de máquinas eléctricas DC y sus aplicaciones en sistemas de posicionamiento, se establecen a continuación los antecedentes.

Los escáneres láser son ampliamente utilizados como sistemas de medición en todo tipo de operaciones que implican la recopilación de información física del entorno mediante métodos a distancia o sin contacto. Pueden ir desde la medición de longitudes hasta adquisición de topografía de superficies y demás características del ambiente en el cual se encuentran. Como dispositivos ópticos, los escáneres láser son capaces de proporcionar la misma cantidad de información de su entorno y a velocidades más altas que los escáneres que utilizan diferentes instrumentos de medición como lo son por ejemplo, los instrumentos de tipo lápiz (Stylus Instrument en inglés) (Leach, 2014). Esta ventaja en velocidad se puede ver en trabajos como (Zhongdong, Peng, Xiaohui, & Changku, 2014), que presenta un escáner láser de imágenes de alto rango dinámico. Y (Xiang, Chen, Wu, Xiao, & Zheng, 2010) donde un nuevo escáner láser de rápido escaneo lineal es desarrollado. En (Alexander, Erenskjold Moeslund, Klith Bøcher, Arge, & Svenning, 2013), se presenta un escáner utilizado para conocer las condiciones de luz de la parte baja de los bosques en los ecosistemas forestales. En (Haddad, 2011) se presenta la ventaja del escáner láser 3D utilizado para la documentación espacial de sitios históricos.

El objetivo principal de los diferentes escáneres láser depende de la aplicación en la que se utilizan. Las recientes aplicaciones del escáner láser se extienden a múltiples campos. Se utiliza para determinar la condición de la vegetación en las plantaciones (Lindner, et al.,

2017). Como sistema de recepción de puntos de georreferencia de terrenos especializados (Reshetyuk, 2010). Incluso como escáner dental para realizar una imagen 3D de alta precisión de la cavidad bucal (Hong-Seok & Chintal, 2015). Para monitorear calidad de soldadura (Lu, Zhang, & Kuang, 2007), obtener modelos 3D de estructuras (Xiong, Adan, Akinci, & Huber, 2013) o en navegación de robots móviles (Ivanov, y otros, 2020). Como tecnología de detección remota, un escáner láser como los sistemas de Laser Imaging Detection and Ranging (LIDAR por sus siglas en inglés) tiene múltiples aplicaciones. Esto por sus amplios modos de operación, versatilidad de utilización de algoritmos, y variedad elementos que los componen.

Como se menciona en (Lindner, Laser Scanners, 2016), existen diversos tipos de escáneres láser tanto en ámbito industrial como el de investigación. Cada uno de ellos utiliza diferentes métodos para realizar mediciones. Pero, todos tienen como tarea primaria, el escaneo de una superficie a través de medios ópticos y la recepción de esta información (por un elemento sensor) para su posterior procesamiento. Este procesamiento se realiza ya sea aplicando novedosamente métodos matemáticos o directamente utilizando potentes procesadores.

Los escáneres láser más eficientes son los sistemas electromecánicos, capaces de medir coordenadas 3D con precisión micrométrica. Sin embargo, la precisión de tales sistemas electromecánicos está significativamente limitada por sus propiedades mecánicas. Hoy en día los investigadores trabajan en la descripción teórica de las fuentes de incertidumbre, con el objetivo de disminuir su influencia (Sepúlveda-Valdez, y otros, 2019).

1.1.1. Sistema de Visión Técnica

El Sistema de Visión Técnica o TVS (Technical Vision System) presentado en el siguiente trabajo es un escáner láser tridimensional que basa su funcionalidad en el principio de triangulación dinámica. Consiste en dos nodos principales, uno que se coloca en la posición deseada y otro que rota a una velocidad constante. Ambos nodos son manipulados por motores de DC. La información sobre los conceptos teóricos y el funcionamiento del sistema se explica ampliamente en el capítulo de marco teórico del presente trabajo de tesis.

Un factor de incertidumbre del TVS se encuentra en la inestabilidad de la velocidad del motor DC que puede crear perturbaciones en las señales del sistema y produce errores en las mediciones 3D calculadas por el sistema (Sergiyenko O. , Tyrsa, Hernandez-Balbuena, Rivas-Lopez, & Devia-Cruz, 2008). Las perturbaciones en la señal se han investigado anteriormente, pero no con enfoque en el motor DC (Flores-Fuentes W. , y otros, 2014).

Debido a que el motor DC es parte primordial de este trabajo de investigación y de la estructura básica del escáner láser toma importancia el mencionar antecedentes de la metodología de control y los controladores de motores DC.

La gama de aplicaciones de este sistema de posicionamientos es muy amplia, un ejemplo de esto es como en (Rodriguez-Quinonez, Sergiyenko, Tyrsa, Basaca-Preciado, & Nieto-Hipolito, 2011) es propuesta la utilización para el monitoreo de la curvatura en la espalda en pacientes con escoliosis. En (Basaca-Preciado, et al., 2010) se utiliza el escaneo tridimensional que provee el TVS para la navegación de robots autónomos. Al igual que en (Sergiyenko, et al., 2016) pero esta vez utilizado para la navegación de un grupo de robots los cuales trabajan en enjambre. En (Rivera-Castillo, et al., 2016) utilizado para la medición y determinación de salud estructural mediante la indicación de puntos de interés y posibles desplazamientos sufridos a través del tiempo.

1.1.2. Controladores para motores DC

Con el fin de aumentar la productividad en el ámbito industrial, se procede al control de los procesos. Con este objetivo en mente, se ajustan toda clase de variables para mantenerlas en un rango deseado u óptimo para el proceso. Estas variables pueden ir desde temperatura y humedad del ambiente hasta velocidad, voltaje y corriente de alimentación del sistema. Cualquier variable física que sea pertinente para el proceso será controlable (Rairan-Antolines & Fonseca-Gomez, 2011).

Una parte primordial en el control de procesos es la medición de las variables a controlar. El paso inicial para el proceso de medición de una variable es la selección del instrumento adecuado para adquirirla. La elección de elemento sensor adecuado es primordial para una correcta aplicación de la metodología del control. En el caso del control de motores eléctricos las variables de velocidad de rotación, voltaje y corriente de alimentación son las principales a ser medidas. En (Kennel, 2007) se realiza un completo recorrido a través del tiempo de los elementos utilizados para la medición de estas magnitudes en la aplicación de procesos de control.

La etapa de control llevará al sistema o proceso a comportarse acorde con los requerimientos deseados, estos requerimientos son llamados criterios de respuesta. En (Rairan-Antolines & Fonseca-Gomez, 2011) se menciona que el proceso de control se encarga de la comparación entre el valor actual de la magnitud medida y el valor deseado para obtener una señal de error. Esta señal es la retroalimentación al sistema y el objetivo de la etapa de control es llevar el error lo más cercano posible a 0.

Existe una amplia gama de metodologías para el control de procesos. El controlador y metodología de control seleccionado para un sistema dependerá de distintos factores como el económico, robustez deseada, escalabilidad, aplicabilidad y muchos más. Por esta razón algunas investigaciones recientes en el ámbito del control de motores DC serán mencionadas a continuación.

La aplicación del control a motores DC se extiende por una amplia gama de ramas, utilizado para la industria aeroespacial, de electrodomésticos, automatización de oficinas, e industrias en general (Chang-liang, 2012). Existen diversas formas de estabilizar la velocidad de operación de un motor de DC. En la literatura se encuentran distintos tipos de aplicaciones y distintas propuestas de control, cada una útil en su respectivo campo y con ventajas y desventajas con respecto a otras propuestas. La elección de los elementos sensores puede variar. Seleccionar el encoder es uno de pasos más típicos (Kennel, 2007). Pero también existen los métodos sensorless, donde el diseñador se ingenia un método para no medir directamente la magnitud a controlar (Gamazo-Real, Vázquez-Sanchez, & Gómez-Gil, 2010). Las metodologías de control utilizadas en la literatura se basan principalmente en la implementación de la Ley de control PID (nombrado así debido a los componentes Proporcional, Integral y Derivativo del controlador) pero también se incluyen combinaciones de propuestas aplicadas novedosamente (Yu & Hwang, 2004) (Huang & Lee, July 2008). La implementación de nuevas teorías y tecnologías en los algoritmos de control está al día con los avances en distintos campos de la computación y cibernética.

Además del tipo de controlador, se selecciona el soporte del algoritmo de control, esto es, si es un microcontrolador, amplificadores operacionales o un procesador digital de señales (DSP, por su sigla en inglés), e incluso un computador. En (Rairan-Antolines &

Fonseca-Gomez, 2011) se realiza una revisión interesante de controladores y sus distintas aplicaciones.

Después de presentado el apartado de antecedentes pertinentes para el tema. Se procederá al planteamiento y delimitación del problema abordado en este trabajo de investigación.

1.2.Planteamiento del problema

En el Instituto de Ingeniería de la UABC se cuenta con un sistema patentado de posicionamiento tridimensional mediante barrido láser que basa su principio de operación en la triangulación dinámica. Este escáner láser presenta una serie de restricciones tanto mecánicas como eléctricas que participan en la generación de fuentes de incertidumbre a la operación del mismo. Debido a factores económicos y de diseño, el escáner está constituido por una serie de motores DC. Al basar su operación en la rotación de estos motores, gran parte de la confiabilidad en las mediciones tomadas por el escáner se encuentra en el funcionamiento adecuado de los mismos. Acorde con esto se plantea, ¿Cuál es el efecto real de la inestabilidad de rotación del motor DC en las mediciones tomadas por el escáner y cómo se puede compensar para aumentar la resolución y precisión del mismo?

El siguiente manuscrito presenta, un análisis de la inestabilidad en velocidad de rotación del motor DC que controla uno de estos nodos; el factor de incertidumbre del TVS antes mencionado. Esta inestabilidad de la velocidad del motor DC puede crear perturbaciones en las mediciones de la señal de reflexión del láser y producir errores en las mediciones 3D calculadas por el sistema.

1.3. Justificación y uso de resultados

En la sección de antecedentes de este capítulo introductorio se menciona la gran ventaja de los escáneres láser con respecto a otros dispositivos de medición que emplean métodos de contacto o tecnologías distintas. Entre las muchas ventajas de los escáneres láser está la velocidad de trabajo y rapidez con la que se pueden obtener mediciones tridimensionales de los objetos de análisis. Al ser dispositivos electromecánicos su funcionamiento y precisión está limitado por sus propiedades mecánicas. Con miras a la compensación de estas limitantes se crean diversas áreas de análisis y trabajos de investigación. Los cuales se realizan con el objetivo de definir claramente las fuentes de incertidumbre de dichos sistemas electromecánicos y compensar sus aportaciones en las mediciones finales de los mismos para tener mayor confiabilidad, resolución y precisión en los datos arrojados por los sistemas. De este análisis, surge la creación del TVS patentado en el Instituto de Ingeniería de la UABC. El cual tiene múltiples aplicaciones tanto en el ámbito industrial, de investigación y social. Con la utilidad y aplicabilidad del TVS, demostrada por trabajos de investigación anteriores se realiza un análisis más completo de una de las fuentes de incertidumbre. El objetivo de este trabajo de investigación es, basándose en análisis comparativo de los métodos existentes de estabilización de la velocidad de revoluciones del motor de corriente directa (DC) elaborar un nuevo método teórico-sintético de control para la apertura de escaneo. El cual poseerá todas las propiedades necesarias para estabilizar la velocidad de revoluciones del motor que controla dicha apertura y compensar las perturbaciones que existan en el funcionamiento del motor DC. Con este fin se logrará aumentar la resolución de barrido láser tridimensional, estabilizar la velocidad de la apertura

de escaneo para el barrido laser otorgando al sistema una mayor resolución y precisión en sus mediciones.

Con este trabajo de investigación se verán beneficiados los futuros investigadores que retomen este sistema y su aplicación. Esto, porque al asegurar una mayor confiabilidad metrológica en sus mediciones se generarán nuevas áreas de oportunidad para realizar trabajos con nuevos enfoques. Beneficiando entonces a investigadores e instituciones en las que se realicen los trabajos de investigación, y áreas de la industria y sociedad donde sea aplicada la funcionalidad del escáner laser.

Acorde con lo planteado en estos párrafos se considera justificada la necesidad de realizar un trabajo de maestría y tesis en esta línea de investigación.

1.4.Objetivos de la investigación

Una vez problematizada la temática en esta investigación se plantea alcance y límites a través de un objetivo general y objetivos específicos.

1.4.1. Objetivo general

Este proyecto de maestría tiene como objetivo principal diseñar e implementar un método de control sintético para la estabilización en la velocidad del motor DC que maneja la Apertura de Escaneo elemento receptor del Sistema de Visión Técnica (TVS) que se encuentra en el laboratorio de Optoelectrónica y Mediciones del Instituto de Ingeniería de la UABC campus Mexicali. Esto, para aumentar la resolución de barrido láser tridimensional y

la precisión en sus mediciones. Generando también, una herramienta teórica para estimación de precisión de las mediciones tomadas con el mismo.

1.4.2. Objetivos específicos

- 1) Investigar y analizar la tecnología y metodología del sistema de posicionamiento tridimensional por triangulación dinámica mediante barrido láser.
- 2) Analizar el error que genera la inestabilidad de la velocidad de barrido (apertura de escaneo) en la resolución y precisión de las mediciones del sistema.
- 3) Analizar las fuentes físicas de error de la inestabilidad de la velocidad de barrido (apertura de escaneo), con el fin de desarrollar el plan de medidas teórico-prácticas para disminuir sus influencias.
- 4) Investigar y analizar el motor DC, para determinar el modo adecuado de uso del motor para funcionamiento correcto del sistema.
- 5) Investigar, analizar y comparar los distintos métodos de control existentes para la regulación de velocidad en motores DC.
- 6) Elaborar en base a la investigación un método teórico sintético de control para estabilización de la velocidad del motor de DC en la apertura de escaneo.
- 7) Integrar el método de control diseñado al sistema.
- 8) Experimentación y recolección de mediciones con el nuevo método de control integrado al sistema.

- 9) Estimar los errores físicos del sistema con el nuevo método de control. Realizar análisis estadístico de la distribución de incertidumbre.
- 10) Corregir los errores físicos, que puedan surgir después de la implementación del método de control diseñado.
- 11) Comparar el funcionamiento anterior del sistema y el funcionamiento con el nuevo método de control.
- 12) Determinar el porcentaje de aumento en la resolución y precisión de las mediciones del sistema.
- 13) Elaborar descripción de instructivo para el uso del sistema de barrido tridimensional con láser acorde con el nuevo algoritmo empotrado de estabilización de velocidad del motor DC.

1.5.Hipótesis

Al proponer este trabajo de investigación de un método de control para la estabilización de la velocidad de un motor DC, con objetivo de aumentar la resolución y precisión de un sistema de barrido por láser, se plantean las siguientes hipótesis:

La aplicación de una metodología de control comprobada como la ley de control PID utilizada novedosamente en el TVS para la estabilización de la velocidad de barrido en la parte receptora, aumentará la precisión y resolución en las mediciones tomadas por el escáner láser.

Una de las principales fuentes de incertidumbre en la operación del escáner láser es la inestabilidad de rotación del motor DC en su parte receptora. Esta inestabilidad genera errores en los ángulos de detección que afectan en gran medida a la medición de coordenadas que realiza el sistema.

Un análisis teórico con bases geométricas del sistema puede resultar en la aportación de una herramienta para la cuantificación absoluta del error en las mediciones hechas por el TVS.

2. Marco Teórico

Para poder alcanzar los objetivos planteados se realizó una investigación teórica en la que se revisó literatura especializada en máquinas eléctricas, motores DC, controladores, métodos de control, y triangulación dinámica. Se realizó un análisis de los componentes que integran el TVS que se encuentra en el Instituto de Ingeniería y sus principales subsistemas como son los motores que controlan al mismo (principalmente en la SA), sensores, el láser, etc. El conocer especificaciones y comportamiento, permite determinar la mejor configuración, y la mejor forma de comunicación posible para el diseño de un sistema de control.

De acuerdo con (Lindner, Laser Scanners, 2016) los escáneres láser se pueden categorizar de la siguiente forma:

- Señales de medición utilizadas (principio aplicado por la parte receptiva del escáner),
- Método de adquisición de las medidas,
- Principio de diseño mecánico del sistema.

Las señales de medición utilizadas para los escáneres pueden ser de láser, de sonar y ópticas. La señal de sonar (Sound Navigation And Ranging) o señal de navegación por sonido es la menos costosa de las utilizadas en los escáneres láser. Una de las principales ventajas de su uso es que funciona adecuadamente sin importar la condición ambiental o de la superficie en la que se utiliza (incluso se puede usar bajo el agua). Como desventaja, tiene una menor precisión en las mediciones que otro tipo de señales. Las señales ópticas, son imágenes obtenidas por medios como las cámaras. Estas señales tienen un funcionamiento

más cercano a la visión humana. Como ventaja principal, pueden visualizar todo el entorno del sistema. En este caso los sistemas reciben más información de la necesaria para realizar mediciones, debido a la gran cantidad de información que requieren las imágenes, lo que consume más tiempo de procesamiento. Además, la falta de iluminación puede hacer que el sistema no funcione correctamente (al igual que la vista humana). El láser (light amplification by stimulated emission of radiation) es la amplificación de luz por emisión estimulada de radiación. Son señales rápidas y que tienen un largo alcance. Como desventaja puede mencionarse, que las lecturas de la señal de láser dependen de la superficie escaneada, además, las distintas fuentes de luz ambiental pueden afectar a las mediciones (Lindner, Laser Scanners, 2016).

Entre los métodos de medición están el tiempo de vuelo (TOF siglas en inglés de Time-of-flight), medición de fase, método de imagen, triangulación estática y dinámica. El tiempo de vuelo (TOF), mide el tiempo total de viaje de un rayo láser, desde que es emitido desde la fuente hasta que es reflejado desde una superficie de escaneo. En la medición de fases, el principio de medición utiliza las diferencias de fase entre el haz láser transmitido y recibido desde una superficie de escaneo. La triangulación estática y dinámica (Sergiyenko O. , et al., 2011), mide el ángulo de reflexión del láser en el elemento receptivo del sistema. En el método de medición de la imagen, los escáneres detectan la intensidad del rayo láser reflejado.

Para clasificar los escáneres láser por su diseño mecánico, es importante hacer hincapié en la aplicación para la que está diseñado el sistema. Si el escáner tiene propósitos de monitoreo de estructuras como lo es un edificio institucional, el diseño será un escáner láser estacionario. Este diseño utiliza trípodes o bases especiales ubicadas estratégicamente

alrededor del edificio para realizar la tarea principal. Si el escáner se usa para aplicaciones de navegación de robots autónomos, el diseño debe ser un escáner láser móvil. El sistema láser se encargará de recopilar la información del entorno de la ruta del robot. En los robots móviles, los escáneres pueden diseñarse dentro de las estructuras de los robots (Reyes-García, y otros, 2020). En (Fu, Menciassi, & Dario, 2012) se realiza el desarrollo de un escáner de bajo costo para robots móviles en miniatura. En los escáneres portátiles, la movilidad y la flexibilidad son las características principales. Los escáneres de mano son el más pequeño de los tres tipos de diseños, se utilizan principalmente como lectores de códigos de barras o dispositivos de medición de distancia.

2.1. Escáner láser basado en triangulación dinámica

En la siguiente sección se presenta el escáner laser o TVS el cual es el objeto principal de estudio de este trabajo de tesis. Además, se realiza el análisis de las propiedades del sistema de posicionamiento en triangulación dinámica mediante barrido laser.

El Sistema de Visión Técnica (TVS por sus siglas en inglés) presentado en (Rivas-Lopez, Sergiyenko, & Tyrsa, 2008) es un escáner láser que constituye un sistema de posicionamiento tridimensional y basa su funcionalidad en el principio de triangulación dinámica. Consiste en un primer nodo llamado Posicionador Láser (LP) (ver Figura 2.1) que emite un haz de láser sobre la superficie a escanear y un segundo nodo llamado Apertura de Escaneo (SA por sus siglas en inglés) que está girando a una velocidad establecida y recibe la parte de la luz láser reflejada por el objeto bajo observación. Estos elementos forman un triángulo por un pequeño intervalo de tiempo en el cual el sistema es capaz de calcular las

coordenadas tridimensionales del punto donde se refleja el láser en la superficie de objeto. Estos cálculos mediante la aplicación de la ley de senos.

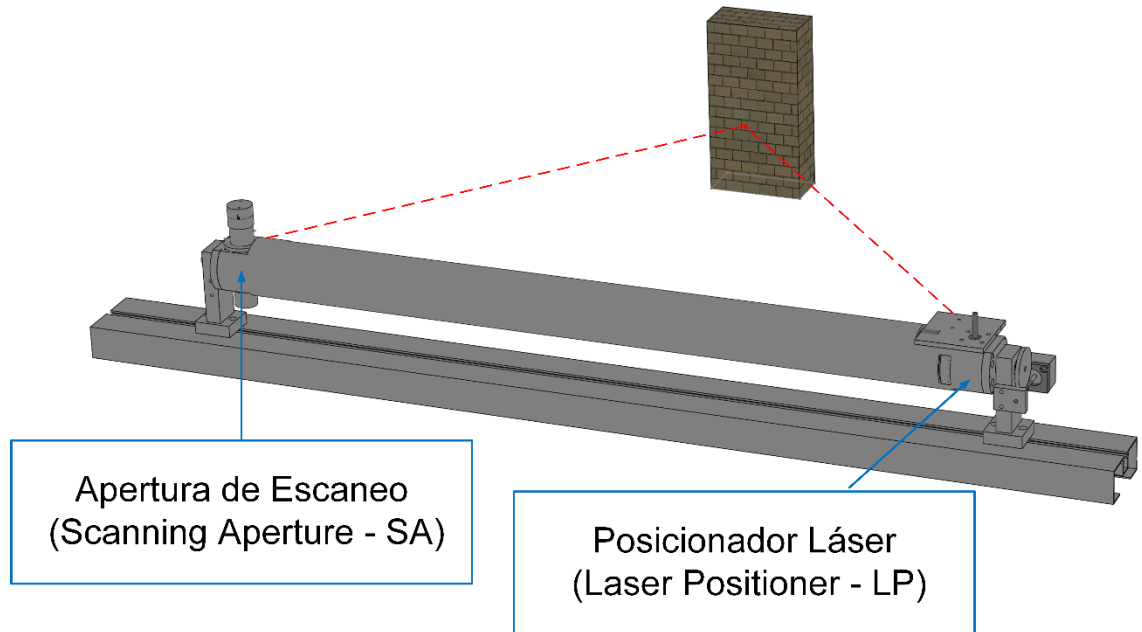


Figura 2.1 Sistema de Visión Técnica (TVS).

2.1.1. Apertura de Escaneo

La apertura de escaneo está conformada por un espejo con corte a 45° , un sensor opto-electrónico llamado Sensor Zero, un foto-detector o foto-transistor denominado Stop Sensor y un motor DC con escobillas (ver Figura 2.2) que mantiene el nodo pasivo del sistema rotando constantemente.

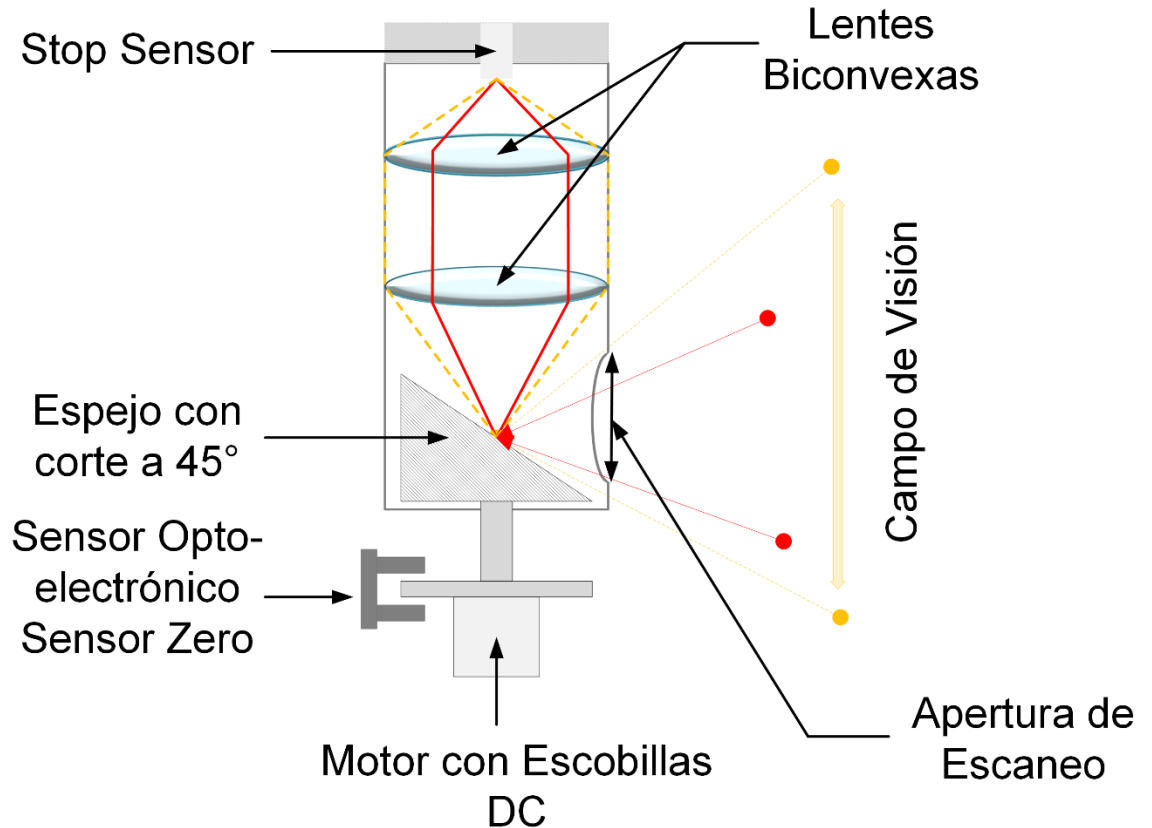


Figura 2.2. Apertura de Escaneo (Scanning Aperture-SA).

2.2. Triangulación dinámica

Como se mencionó anteriormente el escáner láser basa su principio de funcionamiento en un concepto denominado Triangulación Dinámica. La triangulación representa un método de medición para determinar ángulos y distancias mediante funciones trigonométricas. Se utilizan diferentes tipos de triangulación para los sistemas de escaneo láser. En la triangulación estática, los nodos emisor y receptor del sistema de medición son fijos e inmóviles, lo que significa que la capacidad de medir objetos está limitada por el tamaño de los sensores. La falta de movimiento de los elementos del principio de medición define esta triangulación como estática. La triangulación dinámica utiliza dos elementos

dinámicos (nodos). Una activa, que se encarga de emitir un rayo láser y una pasiva que recibirá el rayo láser reflejado. Aquí, el elemento activo posiciona un haz láser hacia un objeto de escaneo deseado, el haz de láser es reflejado por la superficie del objeto (especular o difusamente) y el elemento pasivo, que gira continuamente, recibe la reflexión del láser para formar un triángulo virtual por un pequeño periodo de tiempo. La Figura 2.3 muestra el triángulo formado entre el LP, la SA y la superficie del objeto.

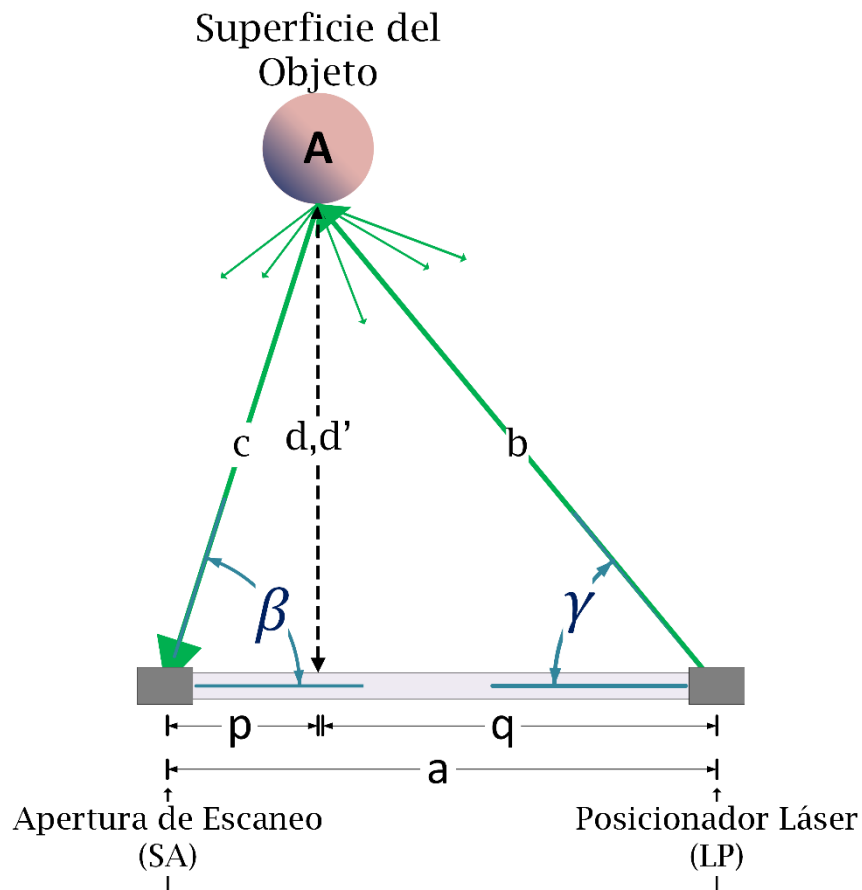


Figura 2.3. Principio de triangulación dinámica (vista superior).

Usando la ley de senos, es posible calcular la distancia d entre el sistema y el punto de reflexión A . En el triángulo, γ y β son ángulos conocidos y con la ayuda de una distancia de separación fija y conocida a entre los nodos activo y pasivo del sistema de triangulación,

la distancia d del sistema al punto de reflexión A se puede calcular utilizando las ecuaciones presentadas a continuación (Basaca-Preciado, Sergiyenko, Rodriguez-Quinonez, & Rivas-Lopez, 2012).

$$d = a \frac{(\text{sen } \beta)(\text{sen } \gamma)}{\text{sen}(\beta + \gamma)} \quad (2.1)$$

$$p = \frac{d}{\tan \beta} = a \frac{(\cos \beta)(\text{sen } \gamma)}{\text{sen}(\beta + \gamma)} \quad (2.2)$$

$$q = \frac{d}{\tan \gamma} = a \frac{(\text{sen } \beta)(\cos \gamma)}{\text{sen}(\beta + \gamma)} \quad (2.3)$$

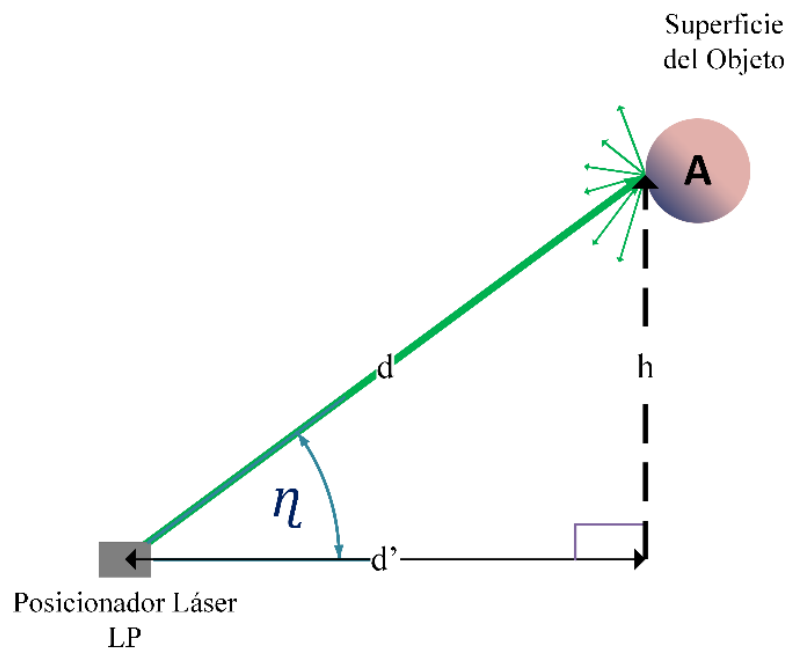


Figura 2.4. Triangulación dinámica (vista lateral).

La Figura 2.4 muestra la vista lateral de la triangulación dinámica. Esta vista representa un triángulo que se utiliza para calcular la altura del objeto. Donde η es el ángulo

de inclinación del TVS. La ecuación (2.4) se usa para medir la tercera coordenada en el Campo de Visión (FOV por sus siglas en inglés) del TVS:

$$h = d(\text{sen } \eta) \quad (2.4)$$

En la Figura 2.4, d' está definido por (2.5), y representa una proyección de la distancia d en la vista superior.

$$d' = d(\text{cos } \eta) \quad (2.5)$$

La triangulación toma su nombre debido a las características dinámicas de los nodos. Estos están en la búsqueda constante de la superficie del objeto. Además, las dimensiones del triángulo virtual también se consideran dinámicas, debido a que la distancia entre el sistema y el objeto bajo observación cambia constantemente.

2.3. Señales del TVS

La Apertura de Escaneo genera varias señales fotoeléctricas que son explicadas a continuación. La principal señal fotoeléctrica en este proceso es la señal proporcionada por el foto-transistor (Stop Sensor) en la parte superior de la SA (ver Figura 2.2). Esta señal se genera a medida que la SA gira y debido a las características de reflexión del haz de láser, el nivel de voltaje de la señal aumenta a medida que la apertura se alinea con el centro de energía del punto en donde se refleja el láser, y disminuye a medida que la apertura pasa sobre este centro. Esto, produce una señal de forma gaussiana (Flores-Fuentes W. , Rivas-Lopez, Sergiyenko, & Lindner, 2014).

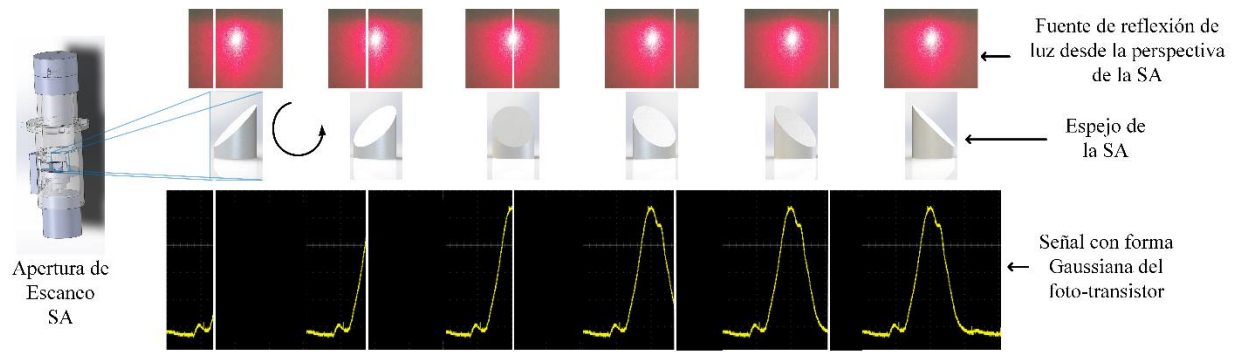


Figura 2.5. Conversión a voltaje de la luz de láser reflejada. Señal de recepción.

La Figura 2.5 muestra una representación gráfica de como este fenómeno (rotación del espejo en SA) genera la señal de recepción con forma gaussiana.

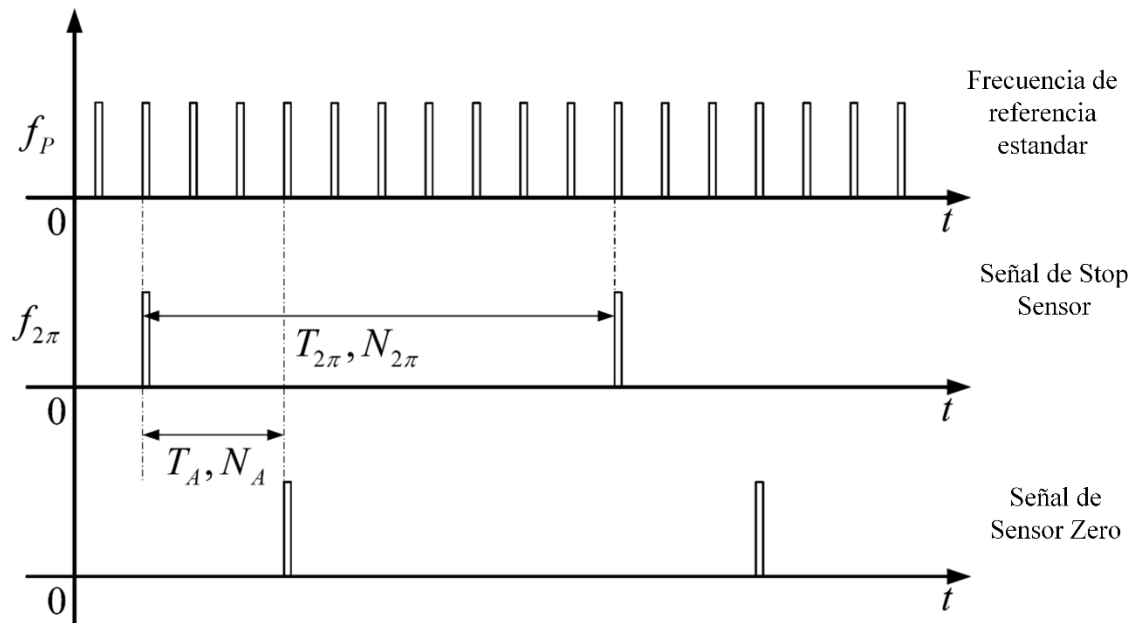


Figura 2.6. Señales fotoeléctricas del sistema.

Una vez que se ha detectado un objeto, el sistema realiza cálculos para determinar el ángulo β_{ij} (donde i y j son los puntos horizontal y vertical en el escaneo 3D completo) del

triángulo formado con la reflexión del láser. Después de calcular β_{ij} y con un valor conocido de γ , es posible obtener las coordenadas 3D del objeto bajo observación.

$N_{2\pi}$ y N_A son las dos variables utilizadas para realizar el cálculo del ángulo de recepción β_{ij} . $N_{2\pi}$ es el número de pulsos de contados de la frecuencia de referencia estándar (f_p) en una rotación completa del espejo. N_A es el número de pulsos contados desde la señal del Sensor Zero hasta la señal de Stop Sensor, que emite una señal cuando se detecta la reflexión del láser. La Figura 2.6 muestra todas las señales fotoeléctricas utilizadas en la SA. Si el láser golpea un objeto en el campo de visión (FOV) del TVS, β_{ij} será el ángulo en el que se detectó la reflexión del mismo. Este ángulo se calcula usando la ecuación (2.6).

$$\beta_{ij} = 360 \frac{N_A}{N_{2\pi}} \quad (2.6)$$

2.4. La geometría del sistema

En términos geométricos, el TVS puede analizarse desde el enfoque de un sistema de ejes Cartesiano utilizado como referencia. El motor con escobillas DC en la SA (elemento pasivo) representa este sistema. En este sistema de referencia llamado O'' , se encuentra el plano de barrido Π , que gira constantemente. La ecuación (2.7), es la ecuación implícita o general de un plano (Cole & al, 2011).

$$\Pi_A = a_p x + b_p y + c_p z + d_p = 0 \quad (2.7)$$

El objetivo de la SA es fijar el momento en que el punto de reflexión o punto A del láser pertenece al plano virtual de escaneo o barrido Π . Esta tarea se puede probar matemáticamente mediante la sustitución de las coordenadas del punto A (ver Figura 2.3) en (2.7). En (2.8) se representa esta ecuación sustituyendo las coordenadas del punto:

$$\Pi_A = a_p x_A + b_p y_A + c_p z_A + d_p = 0 \quad (2.8)$$

Donde a_p, b_p, c_p y d_p son constantes que definen el plano de barrido (que gira con el espejo); x_A, y_A y z_A son las coordenadas cartesianas del punto de reflexión A , resaltada en la superficie u objeto de escaneo por el láser. Si esta ecuación se satisface (la igualdad a cero es verdadera) con los valores del punto de reflexión A , se puede decir que el punto pertenece al plano de barrido Π . También se puede decir que están alineados. Esto significa que la SA enfrenta la energía de reflexión del láser y forma un triángulo con el Posicionador Láser (LP) (elemento activo del sistema). Triángulo necesario para realizar los cálculos y encontrar las coordenadas 3D del objeto frente al TVS.

Para probar la utilidad de esta lógica es necesario calcular la ecuación real del plano de barrido. El plano de barrido Π está formado por dos líneas rectas (vectores): la proyección del vector de fuerza de gravedad en el plano espejo (formado por perpendiculares del vector de gravedad al plano espejo M en la Figura 2.7) y el eje vertical de la SA.

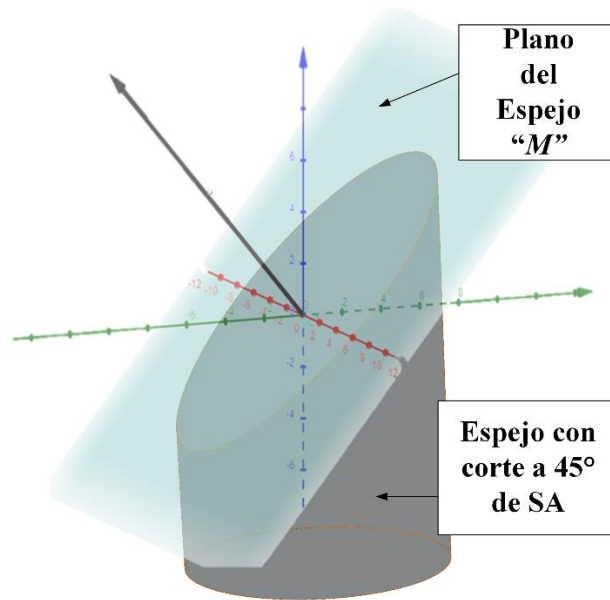


Figura 2.7. Plano del espejo.

Para comenzar el análisis de la geometría del sistema, lo primero que debe hacer es definir que: el corte de 45° de espejo en la SA (Figura 2.7) genera un plano llamado M , este plano del espejo tiene el mismo grado de elevación (45°) con respecto al plano xy del sistema de coordenadas de referencia O'' .

Como se indicó antes, el plano de barrido se forma entre el eje de rotación de la SA y la proyección de la fuerza de gravedad sobre el plano espejo M , por lo tanto, para definir geoméricamente el plano de barrido, es importante hacer algunas suposiciones y definiciones. La primera definición es que el sistema de referencia O'' en la SA tiene su origen o punto $(0, 0, 0)$ en el centro de la elipse del espejo (Figura 2.7). La segunda es que el eje de rotación de la SA está en la misma posición que el eje z del sistema de coordenadas. A partir de estos puntos, el formalismo geométrico para el espejo y el plano de exploración se puede definir con una serie de hechos geométricos.

La geometría analítica indica que un plano está determinado por:

- Tres puntos no colineales (puntos que no están en una sola línea recta),
- Una línea recta y un punto que no pertenece a la línea,
- Dos líneas rectas diferentes que se cruzan entre sí o dos rectas paralelas.

Con esto y el hecho de que el origen de nuestro sistema de coordenadas de referencia O'' está en el centro del espejo, la definición utilizada es la de tres puntos. Con esto se podrá determinar la ecuación del plano del espejo M . El diámetro del cilindro del espejo de Edmund Optics es de 10 mm, por lo tanto el origen del eje de coordenadas está a 5 mm del perímetro del círculo. Después del corte de 45° , el círculo de la base del espejo se convierte en una elipse en el plano de corte. A partir de ahí se tomarán tres puntos: uno en la parte superior de la elipse, uno en la parte inferior y el tercero no en la misma línea. Esto se puede observar fácilmente en la Figura 2.8.

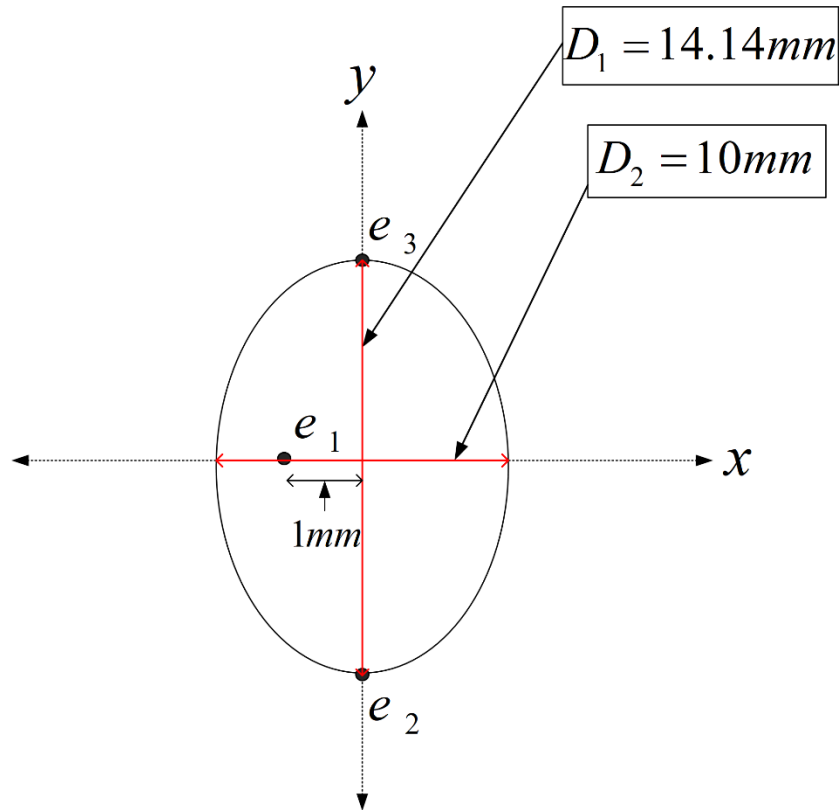


Figura 2.8. Vista superior de la elipse formada por el corte de 45° del espejo.

Las coordenadas reales de estos tres puntos en el sistema de ejes coordenados, se calculan con un análisis trigonométrico. Teniendo en cuenta que la proyección lateral de la elipse del espejo forma un triángulo llamado e_2OA en el plano yz del sistema de coordenadas como se muestra en la (Figura 2.9). En este momento (o posición) el vector normal al plano del espejo está en la dirección del eje $= -y$.

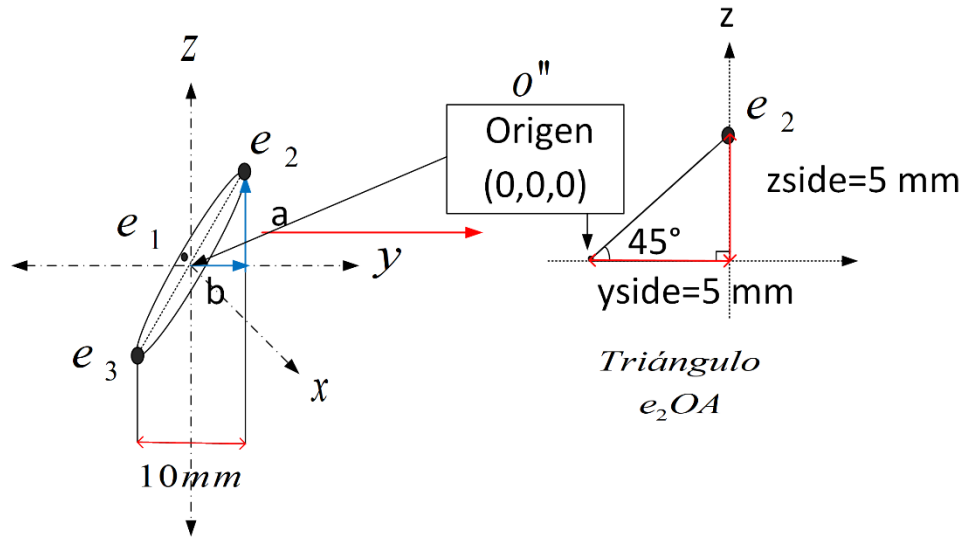


Figura 2.9. Representación gráfica de los puntos definidos.

De la Figura 2.9 se puede ver el triángulo e_2OA generado a partir de este análisis. Los lados del triángulo e_2OA formado por estos elementos medirán 5 milímetros de distancia desde el origen del sistema O'' . Con esto se definen las coordenadas 3D para los puntos e_2 y e_3 . Como se puede ver, el componente $yside$ del triángulo representa la proyección del vector de posición \vec{e}_{2y} , en el eje y del sistema. Lo mismo ocurre con el componente $zside$, pero esta es la proyección en el eje z , por lo que se escribe de la siguiente manera \vec{e}_{2z} .

$$\vec{e}_{2z} = zside = 5mm, \vec{e}_{2y} = yside = 5mm \quad (2.9)$$

Las coordenadas 3D de los puntos e_2 y e_3 son:

$$\begin{aligned} e_2 &= (0, 5, 5) \\ \text{Or} \\ e_2 &= (0, 5mm, 5mm) \end{aligned} \quad (2.10)$$

$$e_3 = (0, -5, -5)$$

Dado que el plano y el punto están orientados hacia la posición cero del sistema (y el movimiento de la SA), no hay coordenadas en el eje x . Pero tan pronto como la SA comience a girar, habrá un componente x para las coordenadas 3D de los puntos. La ecuación de coordenadas de los 3 puntos debe definirse con respecto a la variable de rotación sobre ellos, para que pueda ser real en cualquier posición del ángulo de rotación.

Si el sistema de eje original está representado por el espacio $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$, el sistema de rotación estará representado por espacio $\hat{x}', \hat{y}', \hat{z}'$.

Las coordenadas para cada punto con componentes de rotación se definirán de la siguiente manera:

$$e_2 = a_2(\hat{x}') + b_2(\hat{y}') + c_2(\hat{z}') \quad (2.11)$$

Donde $\hat{z}' = \hat{z}$, y por lo tanto no cambiara con el tiempo o rotación de la SA. \hat{x}' y \hat{y}' conforman el plano que estará rotando con respecto al eje \hat{z}' .

$$e_2 = a_2[\cos(\theta)\hat{x} + \sin(\theta)\hat{y}] + b_2[-\sin(\theta)\hat{x} + \cos(\theta)\hat{y}] + c_2(\hat{z}) \quad (2.12)$$

$$e_2 = (a_2[\cos(\theta)\hat{x} + \sin(\theta)\hat{y}], b_2[-\sin(\theta)\hat{x} + \cos(\theta)\hat{y}], c_2(\hat{z})) \quad (2.13)$$

$$\begin{aligned} e_2 &: (a_2(\hat{x}'), b_2(\hat{y}'), c_2(\hat{z}')) \\ e_3 &: (d_3(\hat{x}'), e_3(\hat{y}'), f_3(\hat{z}')) \end{aligned} \quad (2.14)$$

Como se puede ver en la Figura 2.9, estos dos puntos son colineales y, por definición, el tercer punto no debe estar en la misma línea recta que los dos primeros. Para de este modo cumplir con la definición, el último punto está desplazado 1 mm en el eje x desde el origen,

lo que deja el punto sin alinear con los otros dos, pero en el mismo plano (plano espejo M). Así, las coordenadas 3D del tercer punto estarán cerca del origen con dicho desplazamiento. Las coordenadas 3D del punto e_1 son:

$$e_1 : (g_1(\hat{x}'), h_1(\hat{y}'), i_1(\hat{z}')) \quad (2.15)$$

Donde $g_1 = -1, h_1 = 0, i_1 = 0$, entonces:

$$e_1 : (-1(\hat{x}'), 0(\hat{y}'), 0(\hat{z}')) \quad (2.16)$$

Y de esta manera las coordenadas de los tres puntos necesarios para definir el plano del espejo están completas.

$$\begin{aligned} e_1 &: (g_1(\hat{x}'), h_1(\hat{y}'), i_1(\hat{z}')) \\ e_2 &: (a_2(\hat{x}'), b_2(\hat{y}'), c_2(\hat{z}')) \\ e_3 &: (d_3(\hat{x}'), e_3(\hat{y}'), f_3(\hat{z}')) \end{aligned} \quad (2.17)$$

Estos tres puntos se utilizan para definir dos vectores que generan el plano que en el cual están contenidos. Mediante la resta vectorial de un punto final menos un punto inicial, los dos vectores son los siguientes:

$$\begin{aligned} \overrightarrow{e_1 e_2} &= (a_2(\hat{x}'), b_2(\hat{y}'), c_2(\hat{z}')) - (g_1(\hat{x}'), h_1(\hat{y}'), i_1(\hat{z}')) \\ \overrightarrow{e_1 e_2} &= ((a_2 - g_1)(\hat{x}'), (b_2 - h_1)(\hat{y}'), (c_2 - i_1)(\hat{z}')) \end{aligned} \quad (2.18)$$

$$\begin{aligned} \overrightarrow{e_1 e_3} &= (d_3(\hat{x}'), e_3(\hat{y}'), f_3(\hat{z}')) - (g_1(\hat{x}'), h_1(\hat{y}'), i_1(\hat{z}')) \\ \overrightarrow{e_1 e_3} &= ((d_3 - g_1)(\hat{x}'), (e_3 - h_1)(\hat{y}'), (f_3 - i_1)(\hat{z}')) \end{aligned} \quad (2.19)$$

El producto cruzado de los vectores obtenidos dará un vector que es normal (perpendicular) al plano que contiene ambos vectores. El vector $(\overrightarrow{n_m})$ es el vector normal al plano espejo M .

$$\overrightarrow{e_1 e_3} \times \overrightarrow{e_1 e_2} = \begin{vmatrix} \hat{x} & \hat{y} & \hat{z} \\ (d_3 - g_1)(\hat{x}') & (e_3 - h_1)(\hat{y}') & (f_3 - i_1)(\hat{z}') \\ (a_2 - g_1)(\hat{x}') & (b_3 - h_1)(\hat{y}') & (c_3 - i_1)(\hat{z}') \end{vmatrix} \quad (2.20)$$

$$\begin{aligned} \overrightarrow{e_1 e_3} \times \overrightarrow{e_1 e_2} = & \left[((e_3 - h_1)(c_2 - i_1) - (b_2 - h_1)(f_3 - i_1))(\hat{y}')(\hat{z}') \right] \hat{x} \\ & - \left[((d_3 - g_1)(c_2 - i_1) - (a_2 - g_1)(f_3 - i_1))(\hat{x}')(\hat{z}') \right] \hat{y} \\ & + \left[((d_3 - g_1)(b_2 - h_1) - (a_2 - g_1)(e_3 - h_1))(\hat{x}')(\hat{y}') \right] \hat{z} \end{aligned} \quad (2.21)$$

Sustituyendo las constantes desde a hasta i , se simplifica la ecuación.

$$\overrightarrow{e_1 e_3} \times \overrightarrow{e_1 e_2} = [0] \hat{x} - [(10)(\hat{x}' \hat{z}')] \hat{y} + [(10)(\hat{x}' \hat{y}')] \hat{z} \quad (2.22)$$

$$\overrightarrow{e_1 e_3} \times \overrightarrow{e_1 e_2} = [-10 \hat{x}' \hat{z}'] \hat{y} + [10 \hat{x}' \hat{y}'] \hat{z} \quad (2.23)$$

$$\overrightarrow{e_1 e_3} \times \overrightarrow{e_1 e_2} = \overrightarrow{n_m} \quad (2.24)$$

La ecuación (2.23) es el vector normal al plano del espejo M , representado en la Figura 2.10.

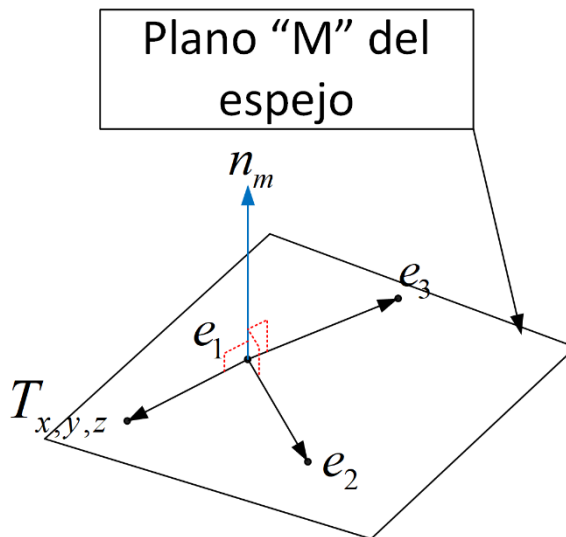


Figura 2.10. Representación gráfica de los vectores que generan el plano.

Para definir la ecuación M del plano del espejo se define un nuevo punto $T_{x,y,z}$ el cual también pertenece a dicho plano. El vector $\overrightarrow{e_1 T_{x,y,z}}$ se genera para poder obtener la ecuación implícita o general del plano.

$$\begin{aligned} T_{x,y,z} &= (x_T, y_T, z_T) \\ e_1 &= (g_1(\hat{x}'), h_1(\hat{y}'), i_1(\hat{z}')) \end{aligned} \quad (2.25)$$

$$\overrightarrow{e_1 T_{x,y,z}} = (x_T - g_1(\hat{x}'), y_T - h_1(\hat{y}'), z_T - i_1(\hat{z}')) \quad (2.26)$$

Este nuevo vector $\overrightarrow{e_1 T_{x,y,z}}$ se encuentra en el plano M , por lo tanto, es ortogonal a $\overrightarrow{n_m}$. El producto escalar o "punto" de dos vectores ortogonales debe ser 0. Por lo tanto, para asegurar que este nuevo punto también pertenece al plano M del espejo.

$$\overrightarrow{e_1 T_{x,y,z}} \bullet \overrightarrow{n_m} = 0 \quad (2.27)$$

$$\overrightarrow{e_1 T_{x,y,z}} \bullet \overrightarrow{n_m} = (x_T - g_1(\hat{x}'), y_T - h_1(\hat{y}'), z_T - i_1(\hat{z}')) \bullet (0, -10\hat{x}'\hat{z}', 10\hat{x}'\hat{y}') \quad (2.28)$$

$$\begin{aligned} \overrightarrow{e_1 T_{x,y,z}} \bullet \overrightarrow{n_m} &= (x_T - g_1(\hat{x}'), y_T - h_1(\hat{y}'), z_T - i_1(\hat{z}')) \bullet (0, -10\hat{x}'\hat{z}', 10\hat{x}'\hat{y}') = 0 \\ \overrightarrow{e_1 T_{x,y,z}} \bullet \overrightarrow{n_m} &= -10y_T(\hat{x}'\hat{z}') + 10h_1(\hat{x}'\hat{y}'\hat{z}') + 10z_T(\hat{x}'\hat{y}') - 10i_1(\hat{x}'\hat{y}'\hat{z}') = 0 \end{aligned} \quad (2.29)$$

Sustituyendo las constantes i y h :

$$\overrightarrow{e_1 T_{x,y,z}} \bullet \overrightarrow{n_m} = -10y_T(\hat{x}'\hat{z}') + 10z_T(\hat{x}'\hat{y}') = 0 \quad (2.30)$$

La ecuación (2.30) es la ecuación real del plano M del espejo.

Esta ecuación (2.30) es válida para cualquier ángulo posible de rotación del espejo en SA y, por lo tanto, para la rotación del plano espejo. Esto debido a los parámetros de rotación de los ejes, agregados a la ecuación implícita del plano. Estos parámetros de rotación están definidos por el Movimiento Circular Uniforme (MCU).

La siguiente fase es definir el plano de escaneo. Como se indicó antes, este plano está formado por la proyección de la fuerza de gravedad (que es una línea recta o un vector que pertenece al plano espejo M) sobre el plano M y el eje de rotación de la SA que está en la dirección del vector unitario \hat{z} . Para definir matemáticamente el nuevo plano, se realizará el mismo cálculo que el anterior, pero esta vez con el objetivo de definir el objeto principal de análisis: el plano virtual (imaginable) de exploración o rotación de la apertura. El cual está buscando el punto de reflexión del rayo láser en la superficie del objeto.

Si el eje de rotación de la SA tiene la misma dirección y posición que \hat{z} , eso significa que el primero de los vectores necesarios para definir el plano de exploración ya se conoce, entonces lo que queda por hacer es calcular la proyección del vector de fuerza de gravedad en el plano espejo M . El eje de rotación de la SA es igual a $\hat{z} = (0,0,1)$.

Para encontrar la proyección del vector de fuerza de gravedad $\vec{g} = -\hat{z}$ en el plano espejo M , es necesario crear un plano auxiliar α , este nuevo plano tiene las siguientes condiciones: el vector \vec{g} le pertenece y es perpendicular al plano M del espejo.

$$\alpha \begin{cases} \vec{g} \in \alpha \\ \alpha \perp M \end{cases} \quad (2.31)$$

$$\alpha = (P, \vec{v}_1, \vec{v}_2) \begin{cases} P \in \vec{g} \\ \vec{v}_1 = \vec{g} \\ \vec{v}_2 = \vec{n}_m \end{cases} \quad (2.32)$$

$$\begin{vmatrix} x-0 & y-0 & z-0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & -10(\hat{x}'\hat{z}') & 10(\hat{x}'\hat{y}') \end{vmatrix} \quad (2.33)$$

$$[0(10(\hat{x}'\hat{y}')) - (-10(\hat{x}'\hat{z}')(-1))]x=0 \quad (2.34)$$

$$(-10(\hat{x}'\hat{z}'))x=0 \quad (2.35)$$

La ecuación (2.35), definida por el determinante (2.33), define la posición espacial del plano α .

$$\alpha \cap \bar{n}_m = \bar{P}_g \quad (2.36)$$

$$\begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ 0 & -10(\hat{x}'\hat{z}') & 10(\hat{x}'\hat{y}') \\ -10(\hat{x}'\hat{z}') & 0 & 0 \end{vmatrix} \quad (2.37)$$

$$-10(\cos(\theta)x + \text{sen}(\theta)y)xz = 0 \quad (2.38)$$

$$(10\cos(\theta)x - 10\text{sen}(\theta)y)xz = 0 \quad (2.39)$$

La ecuación del plano de barrido Π esta expresada en (2.39). Donde:

- θ es el ángulo de recepción β_{ij} ,
- x y y dentro del paréntesis son las coordenadas cartesianas del punto de reflexión A .
- x y z fuera del paréntesis indican la dirección en el espacio 3D real.

Con la aplicación de esta ecuación del plano de barrido se podrá generar a partir de los datos experimentales del prototipo un error dimensional, el cual representa el espacio en el que se puede encontrar un grupo de mediciones y servirá como punto de comparación para métodos o modos de operación del TVS en el capítulo 3 y 4 de esta trabajo de tesis.

2.5.La máquina eléctrica DC

A continuación se presenta el principio de funcionamiento del motor DC y las respectivas ecuaciones que generan su modelo matemático. El motor de corriente continua, motor CC o DC (Direct Current) por sus siglas en inglés es una maquina la cual convierte energía eléctrica en energía mecánica (ver **Figura 2.11**).

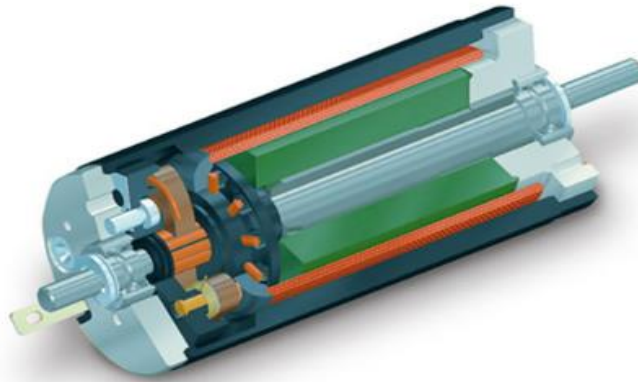


Figura 2.11. El motor DC

El motor está compuesto por un estator el cual es la base o soporte del mismo y que contiene los polos del motor. Y por un rotor que es la parte que genera el movimiento rotatorio.

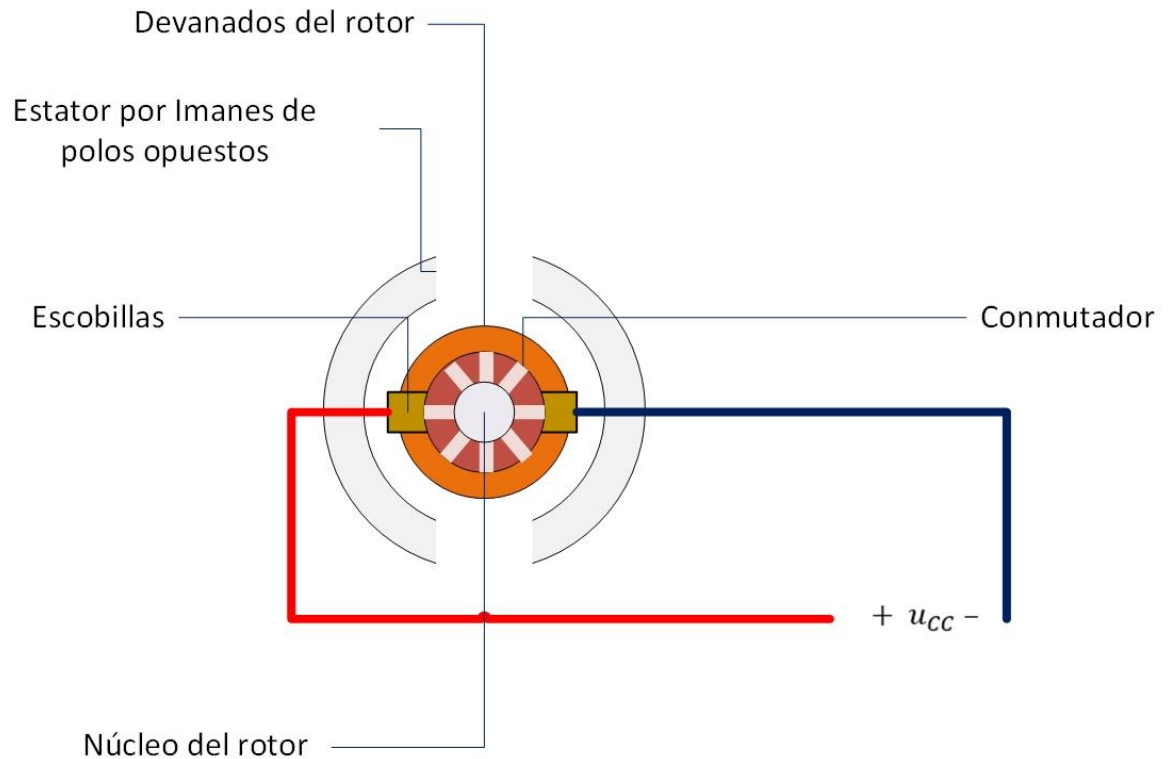


Figura 2.12 *Partes del motor*

La Figura 2.12 es la representación gráfica de las partes del motor DC, en ella se identifican el estator constituido por imanes permanentes de polos opuestos, los devanados del rotor, el núcleo, y conmutador del rotor. Para constituir un motor DC de conmutación por escobillas. El motor DC genera movimiento a partir del campo magnético de los imanes permanentes de polos opuestos. Y al suministrar un flujo de corriente al rotor se genera una fuerza o par que propicia el movimiento angular. De esta base teórica surge el modelo matemático del motor DC.

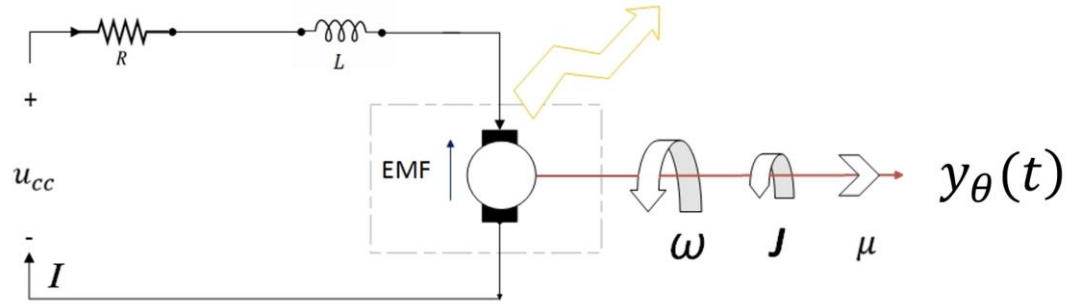


Figura 2.13. Circuito eléctrico del motor DC.

En la Figura 2.13 se muestra el circuito eléctrico del motor DC. En el circuito, $u_{cc}(t)$ es el voltaje de alimentación, $I(t)$ es la corriente de armadura, R es la resistencia de armadura, L la impedancia de armadura, $u_{EMF}(t)$ es la fuerza electromotriz, $\omega(t)$ velocidad angular del rotor, J el momento de inercia del motor, μ coeficiente de viscosidad del motor, $y_\theta(t)$ es la posición angular del eje del motor. En (2.40) $u_{EMF}(t)$ es la fuerza electromotriz que es proporcional a la velocidad angular del rotor $\omega(t)$ por una constante de torque k_u .

$$u_{EMF}(t) = k_u \cdot \omega(t) \quad (2.40)$$

La velocidad angular $\omega(t)$ es la derivada de la posición angular y_θ representado en (2.41).

$$\omega(t) = \frac{dy_\theta(t)}{dt} \quad (2.41)$$

Por la primera ley de Kirchhoff acerca de la conservación de la energía y a la carga en los circuitos eléctricos.

$$u_{cc}(t) - u_{EMF}(t) = R \cdot I(t) + L \frac{dI(t)}{dt} \quad (2.42)$$

$$u_{cc}(t) - k_u \cdot \frac{dy_\theta(t)}{dt} = R \cdot I(t) + L \frac{dI(t)}{dt} \quad (2.43)$$

La ecuación (2.40) se sustituye en la ecuación (2.42) para obtener la ecuación (2.43)

$$T(t) = k_T \cdot I(t) \quad (2.44)$$

Es generado un torque o par motor $T(t)$ al girar el eje del motor por el campo magnético. Por (2.44) el par motor es proporcional a la constante de torque por la corriente de armadura.

$$T(t) - \mu \frac{dy_\theta(t)}{dt} = J \frac{d^2 y_\theta(t)}{dt^2} \quad (2.45)$$

Al presentarse el par motor existe un momento de inercia además el torque es disminuido por el rozamiento dinámico.

$$T(t) = J \frac{d^2 y_\theta(t)}{dt^2} + \mu \frac{dy_\theta(t)}{dt} \quad (2.46)$$

Así que el torque es la suma de los momentos de inercia y coeficiente de viscosidad multiplicados por la aceleración y la velocidad angular del motor DC respectivamente.

$$k_T \cdot I(t) = J \frac{d^2 y_\theta(t)}{dt^2} + \mu \frac{dy_\theta(t)}{dt} \quad (2.47)$$

La ecuación (2.44) se sustituye la ecuación (2.46) para obtener la ecuación (2.47).

$$I(t) = \frac{J \frac{d^2 y_\theta(t)}{dt^2} + \mu \frac{dy_\theta(t)}{dt}}{k_T} \quad (2.48)$$

Se despeja la corriente para poder sustituirla a la ecuación (2.42)

$$\frac{dI(t)}{dt} = \frac{J \frac{d^3 y_\theta(t)}{dt^3} + \mu \frac{d^2 y_\theta(t)}{dt^2}}{k_T} \quad (2.49)$$

$$u_{cc}(t) - k_u \cdot \frac{dy_\theta(t)}{dt} = R \cdot \frac{J \frac{d^2 y_\theta(t)}{dt^2} + \mu \frac{dy_\theta(t)}{dt}}{k_T} + L \cdot \frac{J \frac{d^3 y_\theta(t)}{dt^3} + \mu \frac{d^2 y_\theta(t)}{dt^2}}{k_T} \quad (2.50)$$

De las ecuaciones (2.48) y (2.49) se obtiene la ecuación (2.50) la cual define el modelo matemático de un motor DC.

2.6. Control del motor DC

Para realizar la tarea de estabilizar la velocidad de barrido en la apertura se optó por aplicar la metodología de control PID, en la que se realiza un monitoreo constante de la señal de error en el circuito de control para intentar llevar la planta a una referencia de funcionamiento deseado (Ogata, 2010).

La ley de control PID se presenta en (2.51):

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + \frac{T_D de(t)}{dt} \right) \quad (2.51)$$

Donde:

- $u(t)$ es la salida de control,
- $e(t)$ es el error entre la velocidad real y la velocidad deseada (punto de ajuste) en cualquier momento,

- K_P es la ganancia proporcional,
- T_I es el tiempo integral,
- T_D es el tiempo derivativo del controlador.

El diagrama de bloques de la metodología de control PID se presenta en la **Figura 2.14**. Donde $r(t)$ es la señal de entrada a la planta (referencia), $y(t)$ es la salida de la planta, y $u(r)$ es la salida del controlador PID.

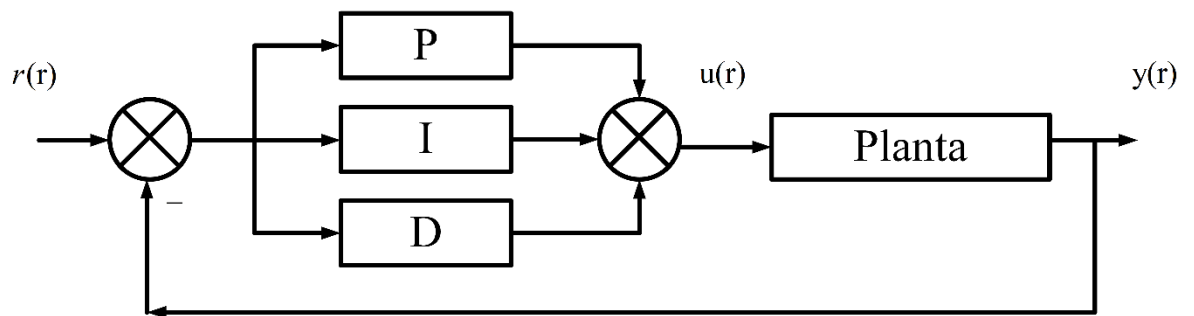


Figura 2.14. Diagrama de bloques controlador PID

Comúnmente, los parámetros del controlador se determinan por experimentación, ajustándolos hasta encontrar un conjunto que cumpla con la respuesta deseada del sistema. Existen métodos de ajuste propuestos en literatura, la mayoría de esos métodos propuestos tienen como base el método de ajuste Ziegler-Nichols. Este método lleva la respuesta a un paso K del sistema y define dos constantes, el retardo de tiempo L_c y una constante de tiempo T_c (ver Figura 2.15) para determinar los parámetros de ajuste.

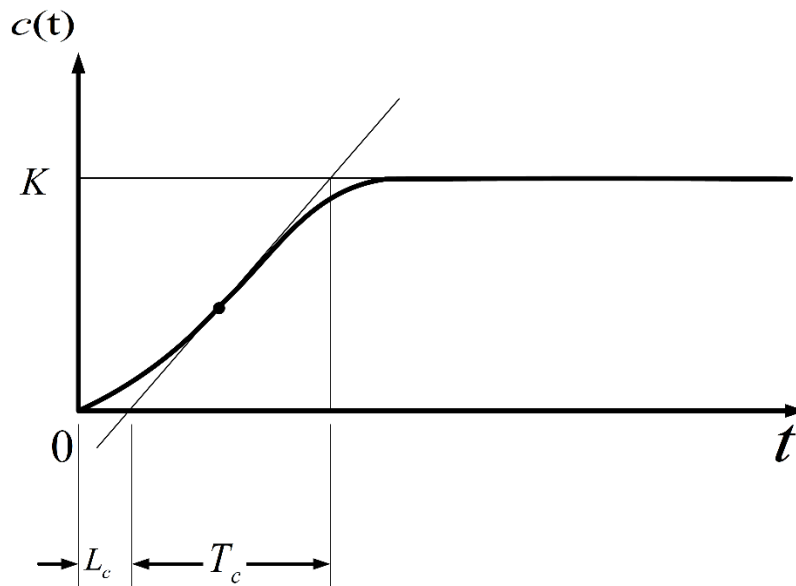


Figura 2.15. Método de ajuste Ziegler-Nichols.

La Tabla 1 muestra cómo ajustar los parámetros según el controlador seleccionado.

Tabla 1. Método Ziegler-Nichols de sintonización de ganancias.

Tipo de Controlador	K_P	T_I	T_D
P	T/L	–	–
PI	$0.9 T/L$	$L/0.3$	–
PID	$1.2 T/L$	$2 L$	$0.5 L$

Comúnmente se utilizan elementos sensores como encoders y tacómetros, para medir la velocidad y posición del motor en todo momento. Para adquirir las señales se usan tarjetas de adquisición de datos, microcontroladores, circuitería especializada y se procesar la

información se emplean programas como LabVIEW y MATLAB Simulink (Huang & Lee, July 2008). En las programaciones se utiliza la lógica de la teoría de control PID y se realizan controladores de posición y velocidad muy eficientes.

2.6.1. Modulación de ancho de pulso

La modulación de ancho de pulso (PWM) es una técnica en la que se utiliza una serie de pulsos digitales para controlar un circuito analógico. La longitud y la frecuencia de estos impulsos determinan la potencia total entregada al circuito.

Comúnmente estas señales de PWM se utilizan para controlar motores DC pero tienen un amplio rango de aplicación en la electrónica.

Un PWM consiste en un tren de pulsos con una frecuencia establecida el cual regula la potencia promedio que es entregada por la señal mediante la variación de los momentos de encendido/apagado que mantiene también llamado ancho de pulso. La relación del ancho de pulso con el período se conoce como el ciclo de trabajo de la señal. En una señal PWM con periodo de 100 ms, con pulsos de 50ms (50 ms encendido y 50ms apagado), tiene un ciclo de trabajo de 50% (Barr, 2001).

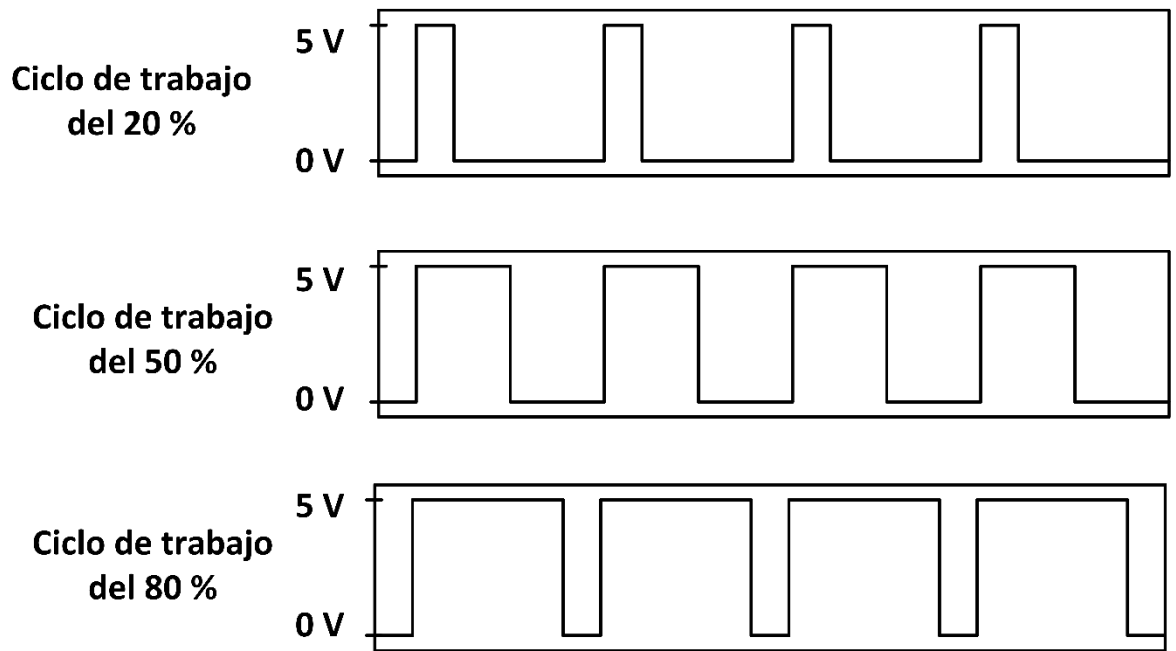


Figura 2.16. Ciclos de trabajo del PWM.

La Figura 2.16 muestra el principio de funcionamiento del PWM, con la representación gráfica de ciclos de trabajo de 20, 50 y 80%. En un ciclo de trabajo de 20% y con una señal de entrada de 5 V el voltaje promedio suministrado por la señal PWM es de 1V.

La aplicación del PWM integrado a la teoría de control PID puede resultar en un controlador de velocidad para la SA que cumpla con las necesidades estabilización las cuales son requeridas por el TVS.

3. Procedimiento de Investigación (metodología)

Después de lo revisado en la literatura sobre métodos para estabilizar la velocidad de operación del motor DC, y de acuerdo a las especificaciones, necesidades y restricciones mecánicas del Prototipo 2 del TVS con el que se trabajó. Se procederá a la explicación detallada del esquema de control propuesto. Se procede a la integración del mismo en el sistema de barrido por láser. Se realiza experimentación para determinar el impacto del esquema de control en la estabilización de velocidad de las revoluciones del motor. Finalmente se determina el aumento en la precisión y resolución de las mediciones obtenidas con el sistema.

3.1.Elaboración de la metodología de control

De acuerdo a la literatura revisada existe una gran cantidad de metodologías que se pueden aplicar para la tarea de controlar la velocidad de barrido de la SA. Principalmente, debido a las condiciones mecánicas actuales del prototipo 2 del escáner laser las cuales son restrictivas en cuanto a la integración de elementos adicionales. Para preservar la mayor cantidad de componentes del prototipo. El motor DC con escobillas permanece como elemento operador del espejo, por lo tanto se propuso el siguiente esquema de control.

Para reducir la inestabilidad de la velocidad de rotación del motor de DC, se realizó un esquema de control para mejorar el rendimiento del mismo, en consecuencia, esto reducirá la variación en los períodos de señal del foto-transistor y por lo tanto el error en el ángulo de

detección β_{ij} . Con una mayor precisión en el ángulo obtenido por la SA, se tendrá un menor error en la medición de coordenadas tridimensionales del TVS.

Las aplicaciones de control que requieren alta confiabilidad o robustez, como el caso de los procesos industriales, comúnmente usan componentes que elevan el costo de los sistemas y complican su implementación. Cuando la robustez en el proceso de control es muy necesaria pero el proyecto tiene un presupuesto limitado (como el caso de los proyectos académicos y de investigación), los componentes de alto costo son reemplazados por otros más accesibles y algoritmos más complejos que requieren más tiempo de proceso y recursos de los sistemas.

El nodo original de la Apertura de Escaneo (SA) original es alimentado directamente de la fuente de voltaje del sistema. Por lo tanto, esta forma de energizar el motor con escobillas no es regulada. Esto, vuelve al motor sensible a cambios de voltaje y corriente en la fuente, los cuales generan inestabilidad. Además, al no contar con ninguna clase de retroalimentación la SA es incapaz de reaccionar a cambios en los modos de operación que puedan ocurrir por efectos de fricción, cambios en la carga o cambios de posición de la apertura (por inclinación del TVS). Por lo tanto, la primer propuesta para lograr estabilizar la velocidad de operación fue crear un esquema de lazo cerrado. Para la aplicación de control deseada, es suficiente un elemento que mida el tiempo de rotación del motor, con el tiempo se calcula la velocidad de cada rotación. Posteriormente se crea el lazo de control con el cual se realiza la comparación, entre la velocidad real y la deseada, como se menciona en la sección de antecedentes de este trabajo.



Figura 3.1. Opto-acoplador

Con el fin de medir la velocidad real del motor DC, se aprovecha el Sensor Zero y se utiliza para esta tarea. Esto, para evitar la integración de un elemento extra (como puede ser un encoder) como sensor de velocidad, de esta manera se mantiene la integridad mecánica de la SA. El opto-acoplador (Sensor Zero) (ver **Figura 3.1**) del TVS, se posiciona en contacto óptico con la base del espejo de la SA (ver Figura 2.2). Esta base tiene una muesca o corte y el Sensor Zero proporciona una señal cada vez que pasa entre sus elementos. La señal aparece cada vez que el motor DC completa una rotación. La **Figura 3.2** muestra el diagrama de bloques del esquema de control.

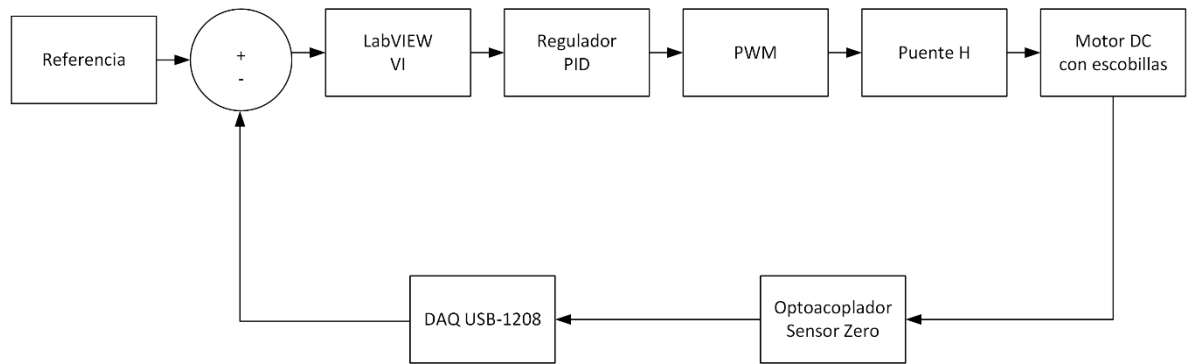


Figura 3.2. Diagrama de bloques del esquema de control en lazo cerrado.

Para adquirir la señal e introducirla al proceso de control se utiliza una DAQ USB-1208LS de Measurement Computing (ver **Figura 3.3**). Estas tarjetas de adquisición de datos son ampliamente utilizadas en aplicaciones de control. El programa de control mide el tiempo que transcurre entre cada emisión de la señal de Sensor Zero. Y posteriormente se hace la conversión de tiempo a frecuencia. Con esto, se detecta la velocidad de cada rotación del motor. El lazo de control se cierra al comparar la velocidad actual del motor con la velocidad deseada.



Figura 3.3. DAQ USB-1208LS de Measurement Computing, para adquisición de la señal de opto acoplador.

Para procesar señales y realizar el programa de control, se utiliza LabVIEW. El programa o VI (Virtual Instrument) de control compara la velocidad actual (adquirida con la DAQ) del motor con la velocidad de referencia. Después de la comparación se genera la señal de error $e(t)$. La función PID en LabVIEW calcula la señal de control adecuada. La señal de control es el ciclo de trabajo definido para el PWM que se ajustará mediante el algoritmo de control en función de $e(t)$. El ciclo de trabajo resultante ajusta la salida a la etapa de potencia del circuito la cual es un puente H (ver **Figura 3.4**). Estos elementos se usan comúnmente en este tipo de aplicaciones.

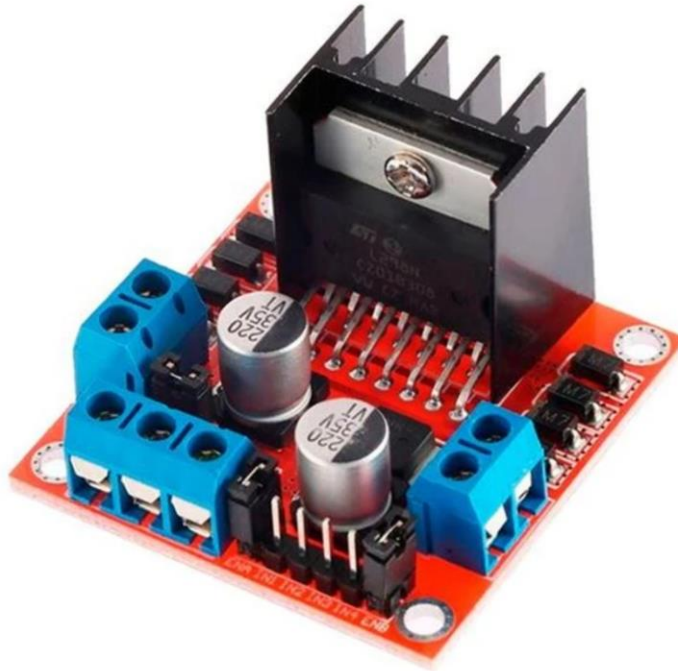


Figura 3.4. Puente H, utilizado como etapa de potencia

Con la instrumentación del controlador establecida, se selecciona el algoritmo de control PID, con esto se hace un seguimiento del error entre la velocidad real y la velocidad deseada en todo momento. Este error se utiliza como retroalimentación para el algoritmo PID. Se seleccionó la teoría de control PID porque (después de encontrar y ajustar las ganancias) no requiere caracterización o calibración antes de comenzar a utilizar el sistema y se empiecen a tomar la medidas, el algoritmo del controlador PID comenzará a estabilizar la velocidad SA desde el momento en que se enciende y la mantendrá de esta manera, hasta el momento en que se apaga el sistema.

La **Figura 3.5** muestra el circuito de control utilizado, en la imagen se puede apreciar la SA, el puente H, desde donde se suministra energía al motor y el arduino con el cual se genera el PWM.

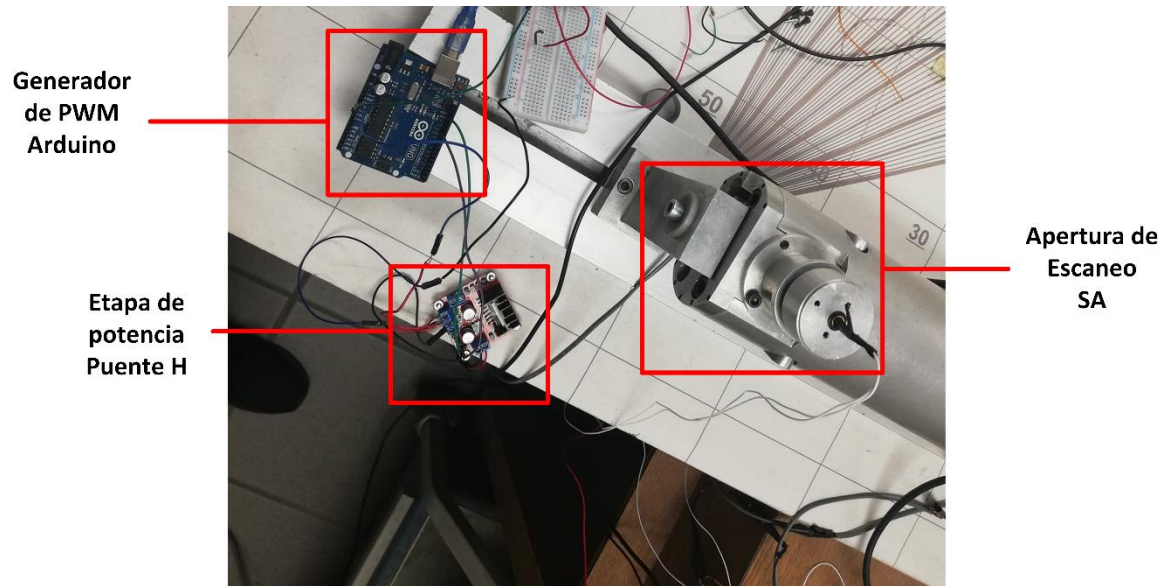
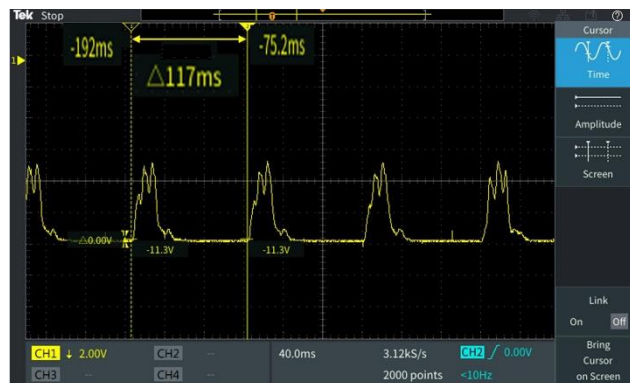


Figura 3.5. Circuito de control para la apertura

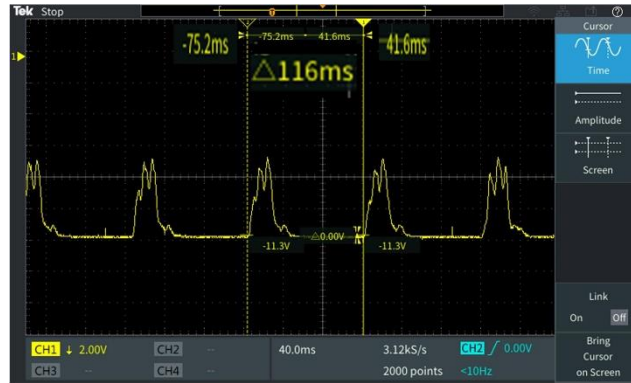
Después de diseñado e integrado el método de control al TVS fue necesario realizar la experimentación pertinente para determinar si existía una mejora en los funcionamientos del sistema. Y más importante aún, determinar el incremento en la precisión y resolución de las medidas tridimensionales tomadas por el mismo. Para esto, fue necesario primero, tomar una serie de medidas en distintas condiciones sin la utilización del controlador. De esta manera, se analizó el error generado por la inestabilidad del motor DC. El análisis detallado de esta experimentación se presenta a continuación.

3.2. Análisis de la señal

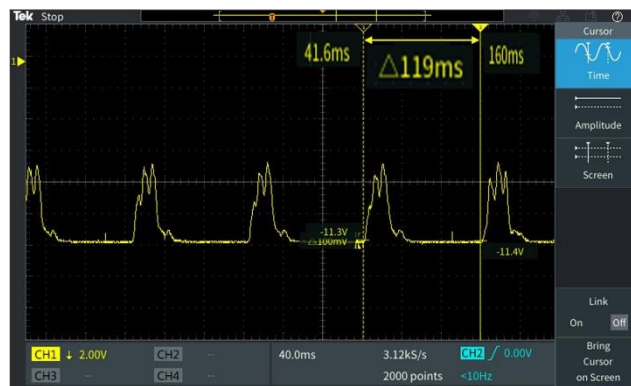
La Figura 3.6 muestra la medición de la señal de Stop Sensor o señal de detección a baja velocidad. Medida por el osciloscopio en el circuito del foto-receptor. Se puede observar que la inestabilidad de la velocidad de rotación de la apertura de escaneo (SA) puede producir períodos irregulares en la aparición de la señal. Esto significa, que hubo aumentos o decrementos en la velocidad del motor. Por lo que cada rotación completa fue distinta en cuanto a periodo de tiempo. De acuerdo con la Figura 3.6 a), el primer período entre las señales tiene un intervalo de tiempo de 117 ms, el siguiente período (Figura 3.6 b) tiene un intervalo de tiempo de 116 ms y el tercer período inmediato es de 119 ms (Figura 3.6 c). Este fenómeno no debería estar sucediendo ya que el sistema está midiendo el mismo punto y está idealmente girando a la misma velocidad. Estas variaciones en el período de la señal causan un error en el ángulo estimación β_{ij} debido a las características de cálculo del sistema por la ecuación (2.6).



a)



b)



c)

Figura 3.6. Señal de detección a la velocidad más lenta posible del sistema, a) primer periodo, b) segundo periodo, c) tercer periodo

Para analizar el error en la medición que genera la inestabilidad en la velocidad de barrido es necesario hacer un análisis estadístico sobre una muestra lo suficientemente grande de datos experimentales. Con esto se determinó la proporción en que afecta este fenómeno a la precisión del TVS al momento de tomar mediciones.

La muestra analizada a continuación es de 486 mediciones distintas tomadas con el TVS en las siguientes condiciones experimentales:

- Velocidad de barrido promedio: 7.6 rps (revoluciones por segundo).
- Distancia del objeto a detectar (pared) al TVS: 1m
- Condiciones de luz: Hora 6:00 PM, Oscuridad.
- Posición del LP: 60°
- Modo de operación: sin controlador.

El primer dato de importancia en esta serie de mediciones es la velocidad angular que mantiene el motor en la Apertura de Escaneo durante cada una de ellas. En la Figura 3.7 se puede observar claramente como la velocidad angular del espejo en la SA no se mantuvo constante durante el experimento. La velocidad de barrido fue inestable. Alrededor de la revolución # 300 alcanzo una velocidad de 9.8 rps y al final de las mediciones la velocidad disminuyo a cerca de las 5.5 rps.

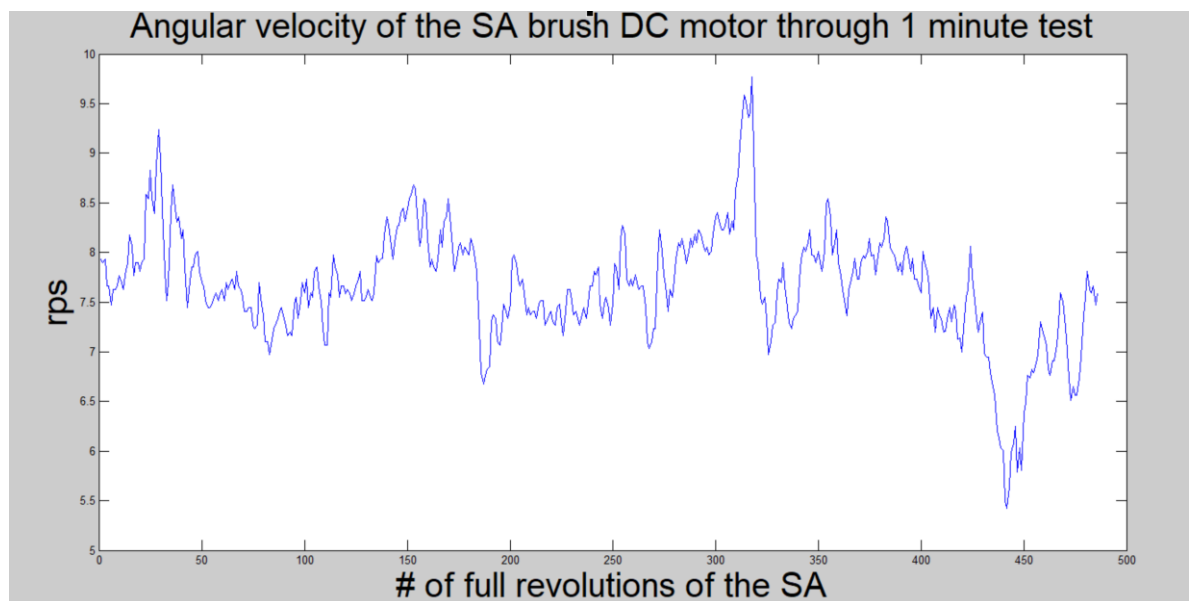


Figura 3.7. Velocidad angular de la Apertura de Escaneo durante experimentación.

Estos cambios en la velocidad de rotación generaron las siguientes variaciones en las mediciones tomadas por el TVS. La variación en el ángulo de recepción β_{ij} se presenta en la **Figura 3.8**. La variación de los datos va desde 63° hasta 72.0536° , un rango en estas mediciones de hasta 9.0536° . Por lo tanto cada medición de ángulo de recepción para el TVS tiene un error de $\pm 9.0536^\circ$.

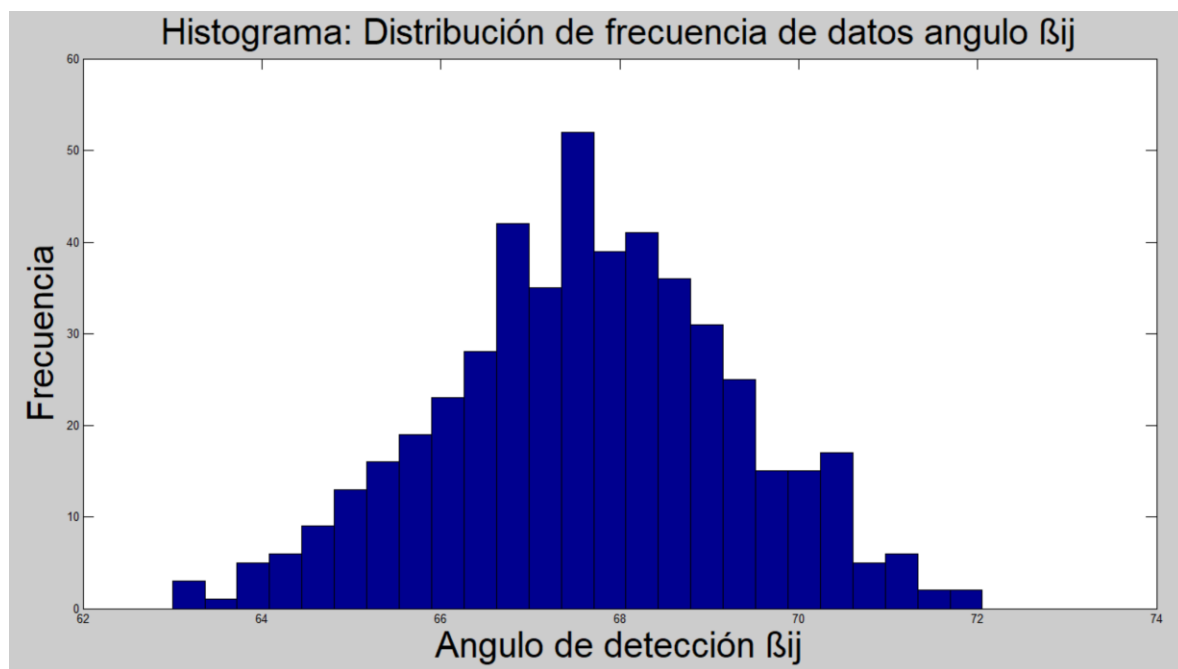


Figura 3.8. Variación en el ángulo β_{ij} calculado por el TVS por efectos de la inestabilidad.

Se puede observar en la Figura 3.9 que las mediciones de distancia tomadas por el sistema para la coordenada en x del objeto a detectar varían desde 0.9714 m hasta 1.1935 m. Un rango en las mediciones de 0.2221 m. Esto, es lo mismo que decir que el sistema en las condiciones actuales tiene una precisión de ± 0.2221 m.

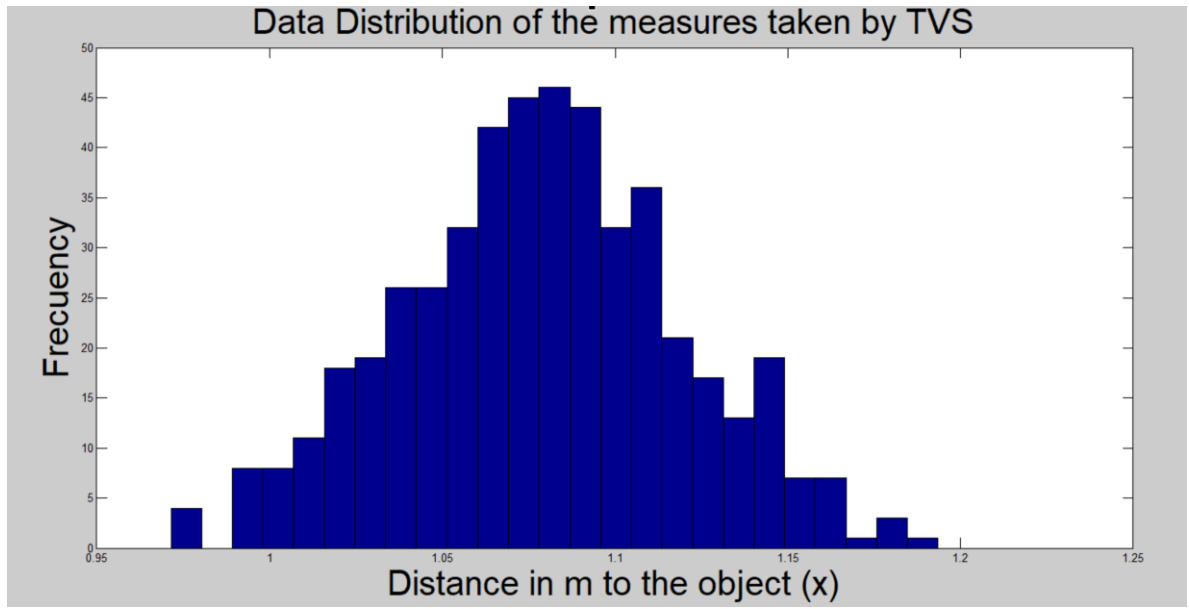


Figura 3.9. Distribución de los datos, medición de distancia en coordenada x.

El mismo análisis se hace para la distancia al objeto medida en la coordenada y . En la Figura 3.10 se puede observar la dispersión de los datos para la distancia medida por el sistema en la coordenada y . Los datos van desde 0.3866 m hasta 0.4950 m, un rango en las mediciones de 0.1084 m para el eje en cuestión. Para una precisión de ± 0.1084 m en cada medición.

Por ultimo en la **Figura 3.11** se muestra la distribución de frecuencia del error absoluto espacial obtenido gracias a la implementación de la ecuación del plano de barrido presentada en la sección 2.4 de este texto. En la figura se observa que el error espacial va desde 0.08 m menos en la medición hasta 0.1 metros más.

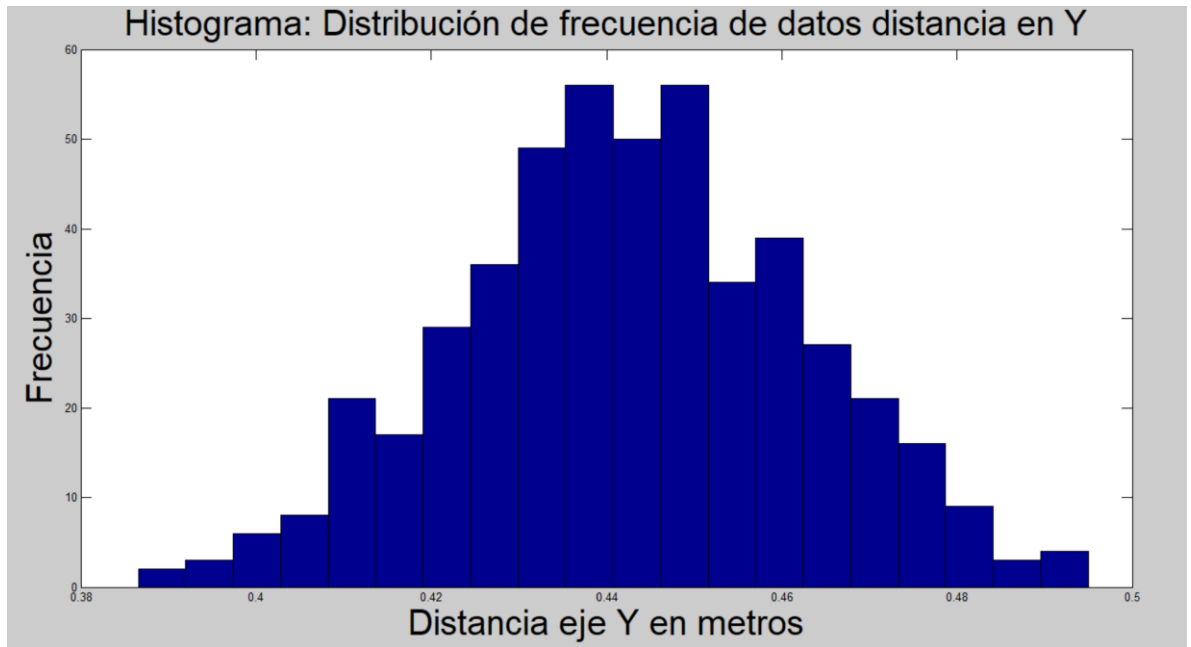


Figura 3.10. Distribución de los datos, medición de distancia en coordenada y.

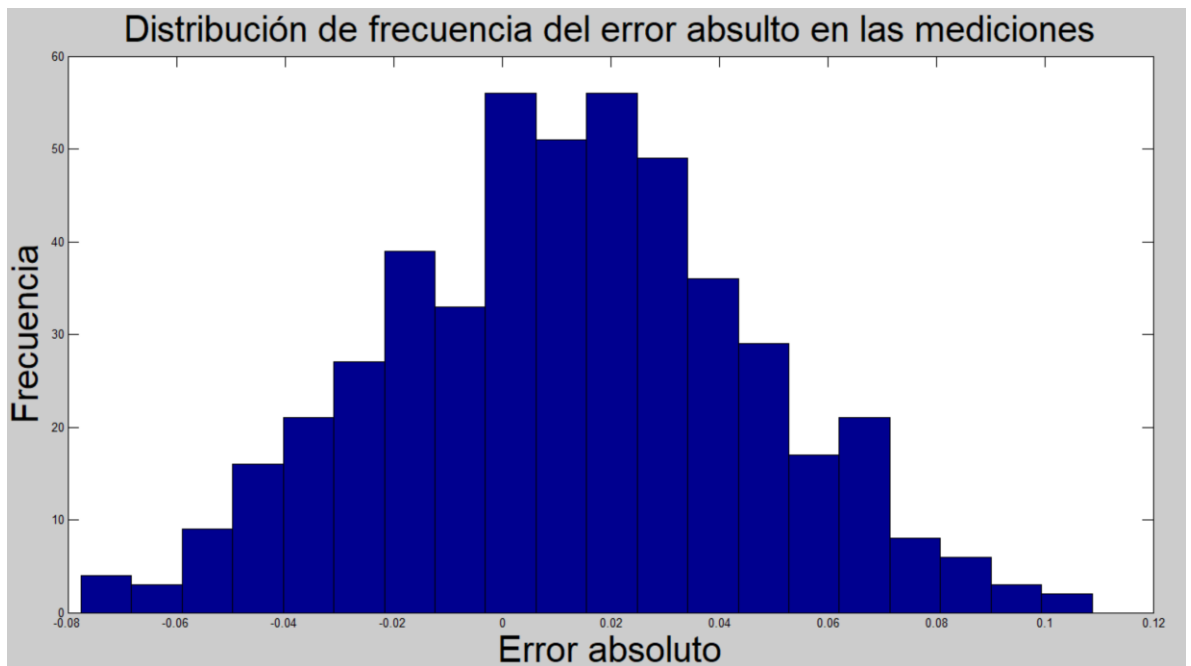


Figura 3.11. Error absoluto en las mediciones (obtenido gracias a implementación de ecuación de plano de barrido).

Para el siguiente análisis cualitativo se deben definir dos conceptos. El primero es el "punto de detección", que es el punto central de energía de la reflexión de rayo láser. Punto donde el rayo láser golpea el objeto bajo observación y punto más alto en la señal con forma de campana Gaussiana. El segundo es el "período de detección", que es el tiempo entre inicios de señales consecutivas con forma de campana de Gauss. De la Figura 3.12 a la Figura 3.14 se puede observar que para el mismo punto de detección la señal tiene diferencias entre períodos consecutivos. De la Figura 3.12, el primer período detectado es de 117 ms (que es el tiempo que el motor necesitó para completar una rotación). La Figura 3.13 muestra el siguiente período, con un tiempo de 116 ms. Por lo tanto, esta vez el motor realiza la rotación completa más rápido que la anterior (el motor acelero por alguna razón desconocida). La última Figura 3.14 muestra el tercer período de detección consecutivo de la señal ahora con 119 ms de intervalo de tiempo. Idealmente, todos los períodos detectados deben tener el mismo intervalo de tiempo. Se puede ver en las Figura 3.12 a Figura 3.14 que ninguno de los 3 períodos detectados consecutivos tiene el mismo intervalo de tiempo. Esto, debido a la inestabilidad de la rotación del motor con escobillas de DC que manipula la apertura, ya que el motor no tiene una velocidad de rotación estable, puede completar una rotación en menos o más tiempo. Esto producirá que la señal detectada del Stop Sensor este cambiando en la escala de tiempo para el mismo punto de detección fenómeno que puede producir un error en el ángulo de detección del sistema.

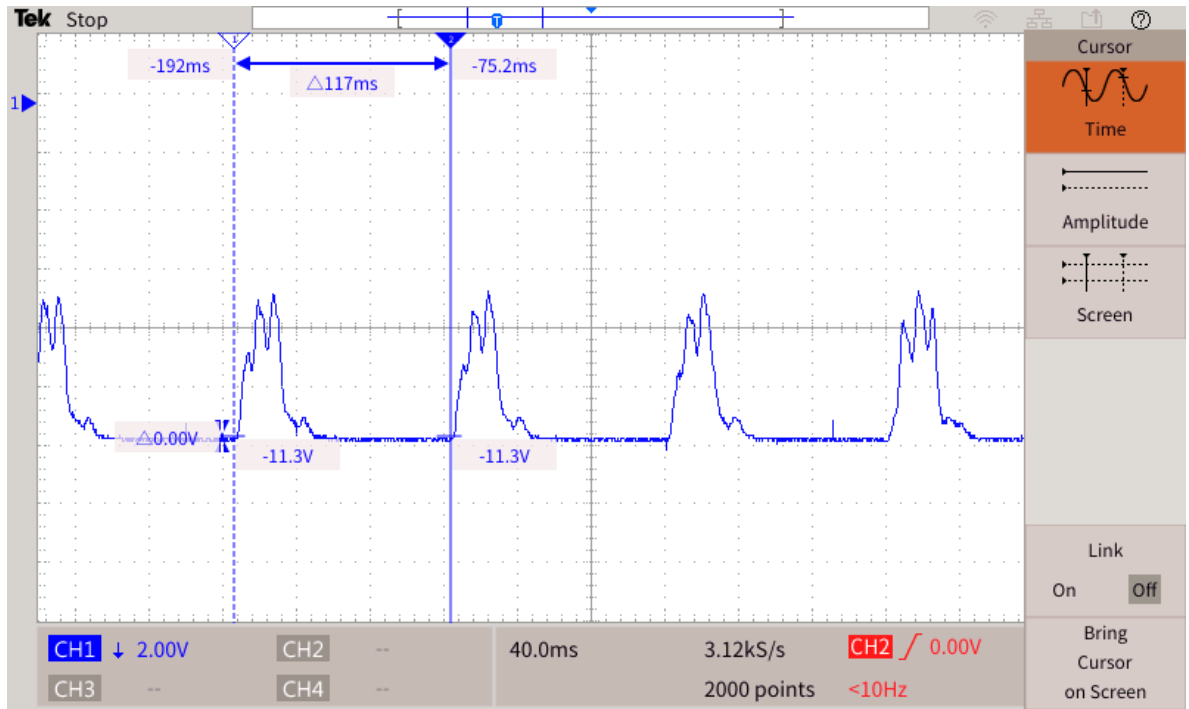


Figura 3.12. SA a la más baja velocidad posible, primer periodo de detección.

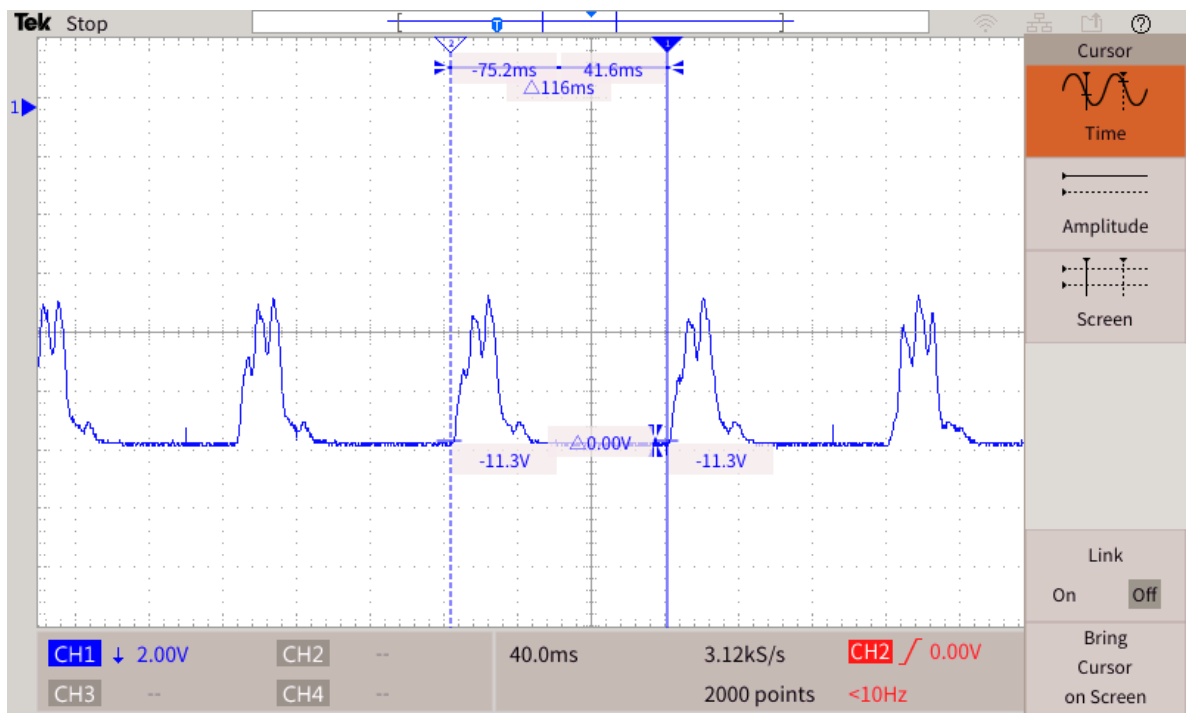


Figura 3.13. SA a la más baja velocidad posible, segundo periodo de detección.

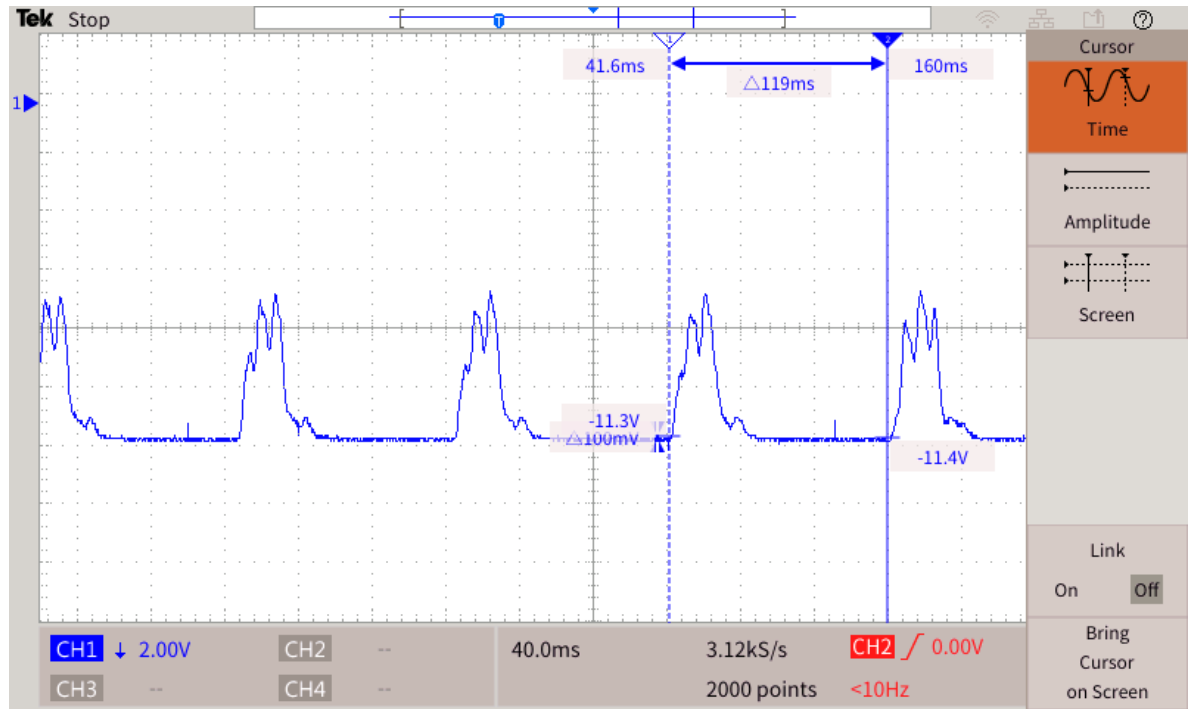


Figura 3.14. SA a la más baja velocidad posible, tercer periodo de detección.

Para demostrar que este fenómeno se presenta para cualquier tipo de condiciones ambientales y de rendimiento, se analiza la misma situación en diferentes condiciones de operación del sistema, como la velocidad de rotación, la operación diurna y la posición de observación del objeto. Para determinar la afectación de los distintos factores físicos a la adquisición de señales del sistema. Por lo tanto, la Figura 3.15 muestra la señal del Stop Sensor aislada de la luz del día a la velocidad más baja posible. Como se puede ver, la forma de la señal detectada ha cambiado, debido a que ahora el rayo láser reflejado es la única fuente de luz que llega al SA y, por lo tanto, no hay ruido óptico que afecte la forma de la señal. Aunque la forma de la señal ha cambiado, las diferencias de los períodos de señal aún están presentes en este modo de operación

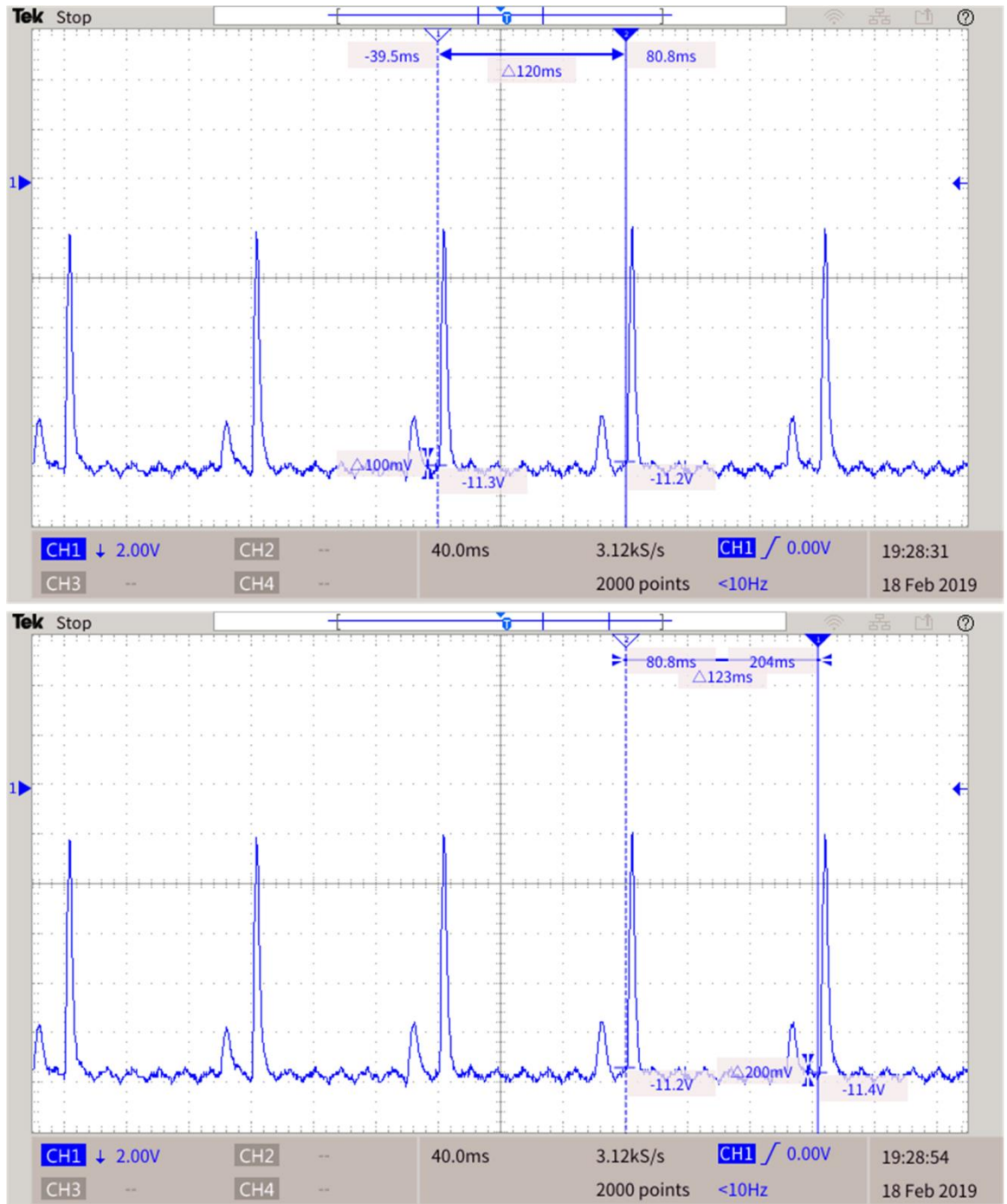


Figura 3.15. Periodos de la señal de detección con aislamiento del sistema de la luz de día.

La Figura 3.16 representa la señal de detección a una velocidad aumentada y aislamiento de la luz del día. Dado que el motor con escobillas de DC gira más rápido que

en las figuras anteriores, los períodos de señal se han reducido en tiempo. En teoría, este cambio de velocidad generará menos problemas de fricción y el motor tendrá más estabilidad de rotación. Sin embargo, se puede ver que los períodos de detección todavía tienen diferencias entre ellos debido a la inestabilidad del motor.

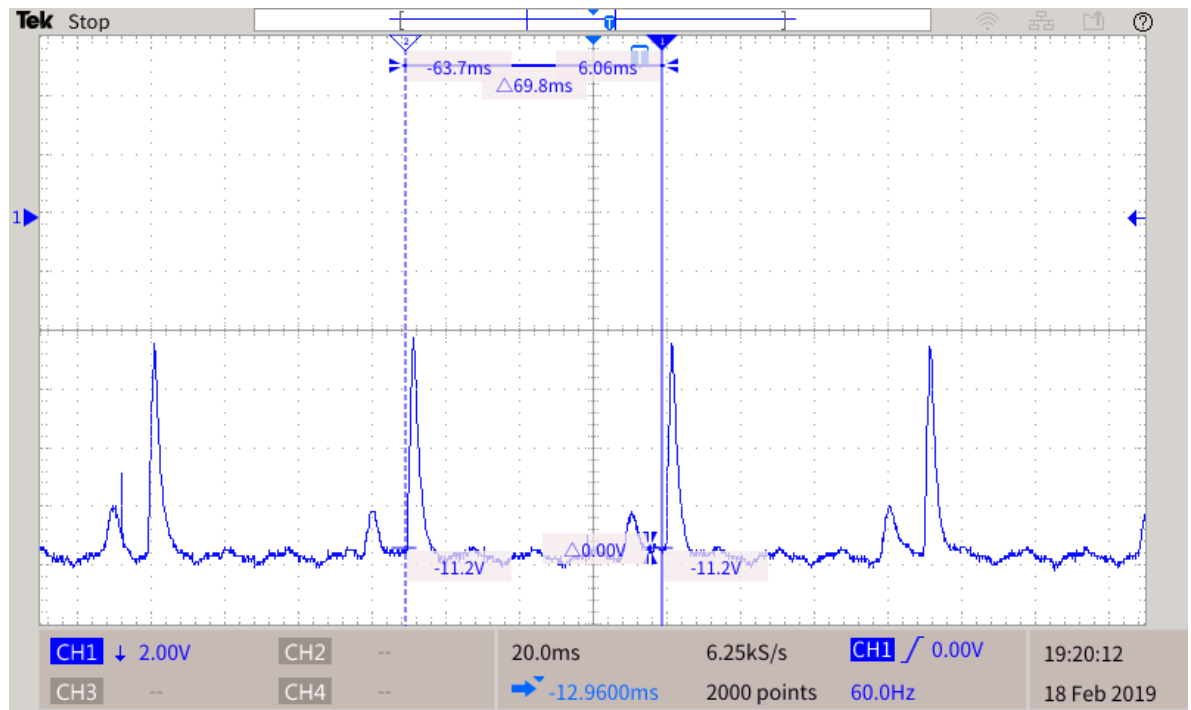


Figura 3.16. Señal de detección con velocidad aumentada.

De este análisis concluimos que efectivamente la inestabilidad del motor DC de la apertura de escaneo afectaba a la señal obtenida por el Stop Sensor. Dicha inestabilidad provocaba errores en la detección del ángulo β_{ij} y por lo tanto errores en las mediciones tridimensionales del TVS.

Aun con este análisis es necesario comparar los datos experimentales del funcionamiento con controlador y sin controlar del TVS. Para esto, se desarrolló una herramienta que analiza el error presente en las mediciones tomadas por el sistema de los dos

modos de operación más rápida y efectivamente. Además el desarrollo de esta herramienta para analizar los datos permitirá comprobar la utilidad de la ecuación del plano de barrido presentada en la sección 2.4.

Es importante crear una herramienta que permita recolectar y analizar la gran cantidad de datos tomados por el TVS. Con ayuda de dicha herramienta se podrá realizar el análisis estadístico pertinente sobre las mediciones. Por esta razón, se creó un programa en Matlab para la recolección de datos, reconocimiento de los mismos y validación de la ecuación del plano de barrido. El programa y su funcionamiento son detallados durante el siguiente capítulo.

Para recolectar los datos necesarios se utilizó la función de guardado de señales en memoria USB del Osciloscopio TBS2000 Series de Tektronix (Figura 3.17) encontrado en el laboratorio.

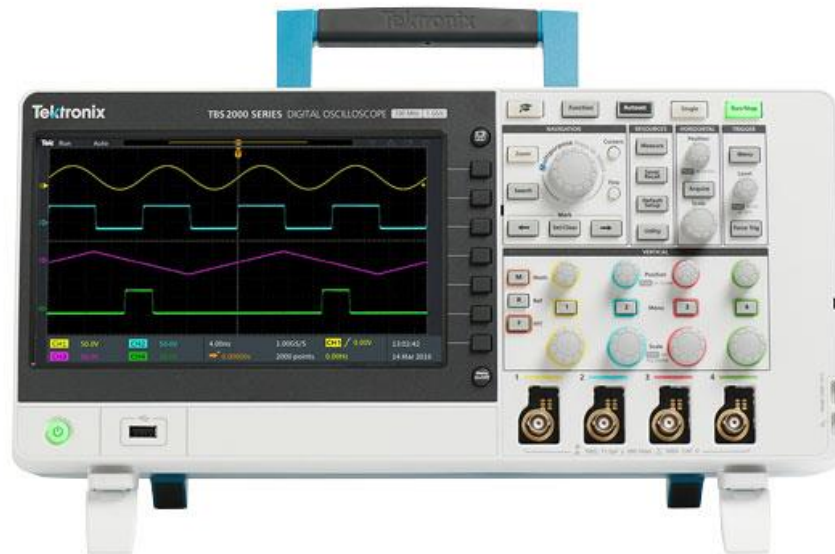


Figura 3.17. Osciloscopio TBS2000 Series, utilizado en las pruebas de laboratorio.

Este Osciloscopio tiene la capacidad de almacenar las señales que presentes en su pantalla en un archivo de valores separados por coma (CSV por sus siglas en inglés). Además, la función zoom permite tomar muestras grandes de datos y poder verlos más detalladamente en la pantalla.

Se tomaron muestras de datos, directamente del prototipo del sistema láser. Conectando el canal 1 y canal 2 a las señales del opto-acoplador (Sensor Zero) y el foto-receptor (Stop Sensor) respectivamente. El osciloscopio fue programado de la siguiente manera:

- Escala horizontal: 4 segundos por división.
- Escala vertical: 1 Volt por división.
- Intervalo de muestra: 0.00032 segundos.
- Tamaño de muestreo: 200000 datos.

- Canales utilizados: CH1 y CH2

Lo que significa que cada tabla importada a USB en formato de Excel, tendrá 200000 pares de datos: tiempo y voltaje. Se obtiene una tabla de estas características para cada canal (conectados a las señales antes mencionadas).

Tabla 2. Ejemplo de tabla importada a USB con osciloscopio.

Model	TBS2104	
Firmware Version	v1.23	
Point Format	Y	
Horizontal Units	S	
Horizontal Scale	4	
Sample Interval	0.00032	
Filter Frequency	1.00E+08	
Record Length	200000	
Gating	0.0% to 100.0%	
Probe Attenuation	10	
Vertical Units	V	
Vertical Offset	0	
Vertical Scale	1	
Label		
TIME	CH1	
-3.20E+01	0.239453	
-3.20E+01	0.239453	
-3.20E+01	0.258984	
-3.20E+01	0.258984	
-3.20E+01	0.297852	
-3.20E+01	0.297852	
-3.20E+01	0.342773	
-3.20E+01	0.342773	
-3.20E+01	0.390234	
-3.20E+01	0.390234	
-3.20E+01	0.297852	

En la Tabla 2 se muestra el ejemplo de tabla importada a Excel como archivo separado por comas (extensión .csv). La tabla consta de 3 secciones principales, detalladas a continuación:

- En la sección 1 (azul) se muestran los datos del osciloscopio con el que fueron capturadas las señales. Aquí podemos observar la programación mencionada con la que se trabajó.
- La sección 2 (rojo) presenta los valores de voltaje tomados de la señal para cada instante de tiempo.
- La sección 3 (verde) son los valores de tiempo del osciloscopio que están ligados a un valor de voltaje específico.

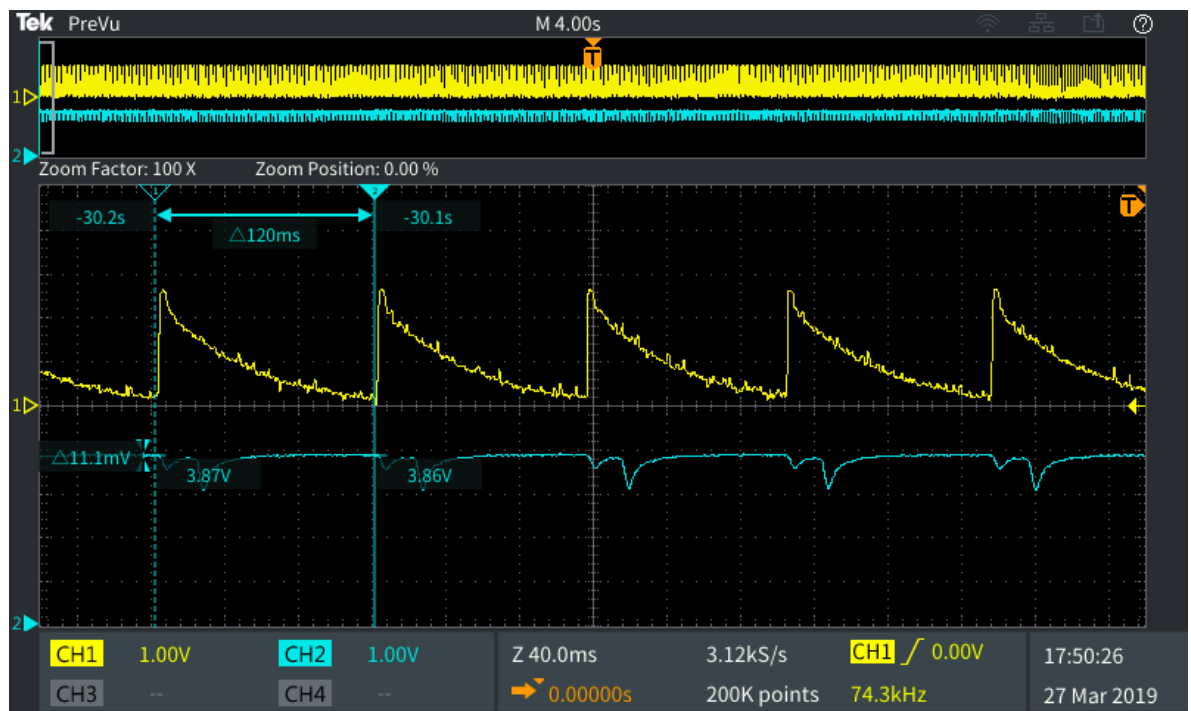


Figura 3.18. Captura de pantalla de osciloscopio. Señales medidas: Sensor Zero-Amarrillo, Stop Sensor-Azul.

La Figura 3.18 muestra una captura de pantalla del osciloscopio y las señales tomadas. El canal 1 (amarillo) es el Sensor Zero (opto-acoplador) y el canal 2 (azul) el Stop Sensor (fototransistor). Además, en la figura se puede apreciar la utilidad de la función Zoom del osciloscopio. En la parte superior esta la captura completa de las señales, y como se vería en pantalla completa. Pero gracias al zoom del osciloscopio se pueden ver con mayor detalle.

1	Model	TBS2104
2	Firmware Version	v1.23
3		
4	Point Format	Y
5	Horizontal Units	S
6	Horizontal Scale	4
7	Sample Interval	0.00032
8	Filter Frequency	1.00E+08
9	Record Length	200000
10	Gating	0.0% to 100.0%
11	Probe Attenuation	10
5741	-3.02E+01	1.01973
5742	-3.02E+01	1.01973
5743	-3.02E+01	2.4418
5744	-3.02E+01	2.4418
5745	-3.02E+01	2.65391
5746	-3.02E+01	2.65391
5747	-3.02E+01	2.66563
5748	-3.02E+01	2.66563
5749	-3.02E+01	2.65527
5750	-3.02E+01	2.65527
5751	-3.02E+01	2.65098
5752	-3.02E+01	2.65098
5753	-3.02E+01	2.5541
5754	-3.02E+01	2.5541

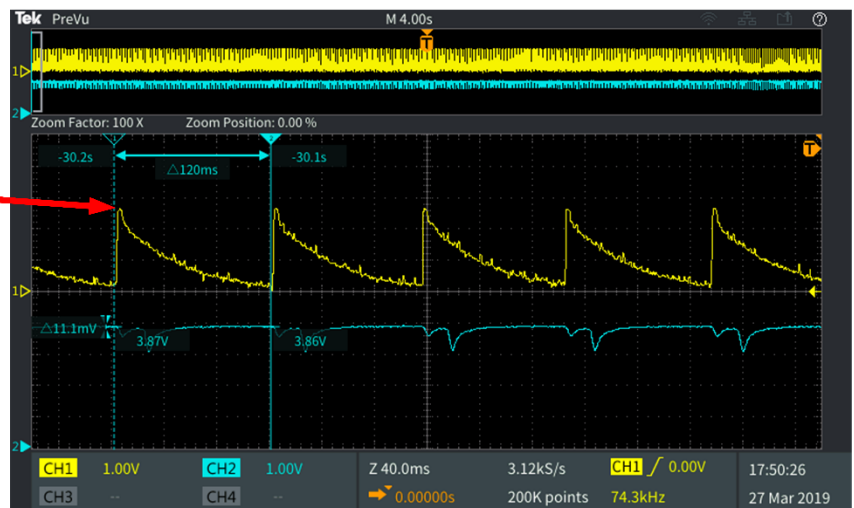


Figura 3.19. Representación gráfica de generación de la tabla importada.

La Figura 3.19 es una representación de cómo se generan las tablas. Como se puede observar, el pico de voltaje en el canal 1 es el dato # 5743 tomado por el osciloscopio. Se presenta en $t = -30.2$ segundos de la escala de tiempo del osciloscopio. De la misma manera, para cada tiempo existe un nivel de voltaje relacionado. Dado que son dos señales las que se utilizan durante la medición del ángulo de recepción del sistema, se obtienen dos tablas.

El programa 'Final.m' desarrollado en Matlab se encarga de tomar los datos de las tablas para procesarlos y calcular los ángulos de recepción en cada momento. Esto se logra al medir el periodo de tiempo en el que llegan las dos señales cada vez que aparecen. Después, se relacionan para calcular cuánto tiempo hay entre la aparición de ambas señales. Y con los datos de tiempo se calcula el ángulo de recepción. El programa y su funcionalidad están completamente detallados a continuación.

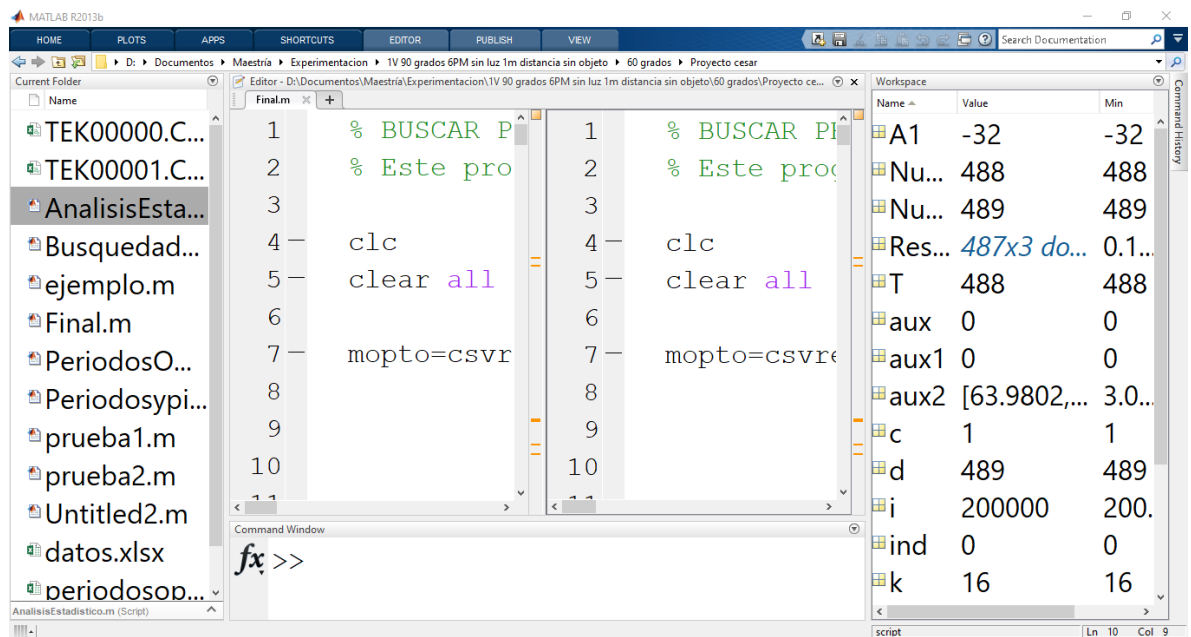


Figura 3.20. Pantalla completa Matlab

La Figura 3.20 es una captura de pantalla de la interfaz de Matlab en la que se muestran las partes principales (script o editor, workspace, current folder) explicadas más adelante.

```
1 % BUSCAR PERIODOS DE DATOS OP1
2 % Este programa sirve para bus
3
4 clc
5 clear all
6
7 mopto=csvread('TEK00000.CSV',1
8
9
10
11
12
13
14 Al= mopto(1,1);
15
16 Al= mopto(1,1);
17 for i=1:length (mopto);
18     mopto(i,1)=mopto(i,1)+(-Al)
19 end
20
21 mat=zeros(size(mopto)-1);
22
23
24 for i=1:length(mopto)
25
```

Figura 3.21. Captura de pantalla de Editor en Matlab – Programa: Final.m

La Figura 3.21 es una captura de pantalla del programa Final.m en Matlab, en la imagen se puede apreciar el script de matlab o editor. En la parte superior de la ventana aparece la ruta de acceso donde está guardado el programa. La captura presenta la utilidad de pantalla dividida de Matlab.

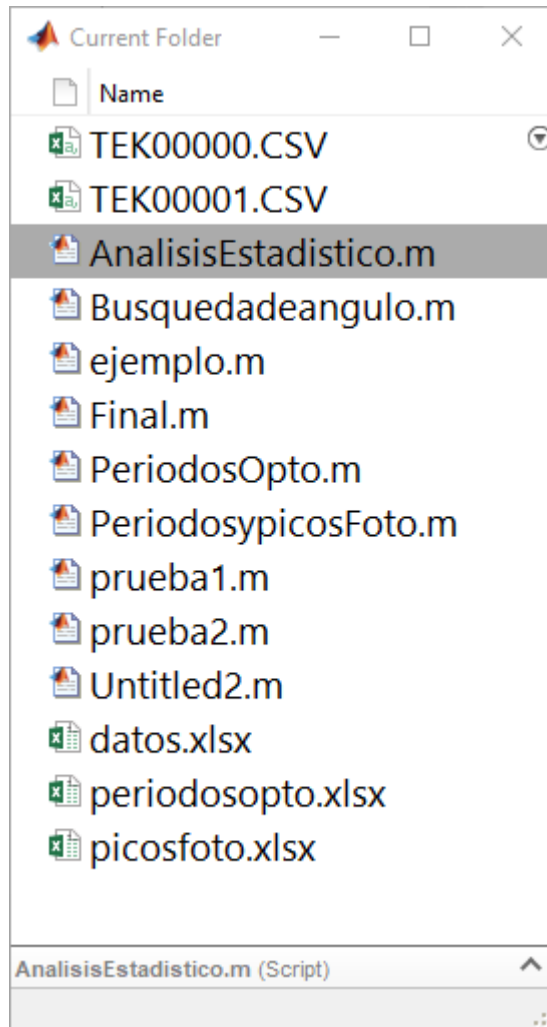


Figura 3.22. Sección *current folder*-Matlab.

La Figura 3.22 es la sección ‘current folder’ de Matlab en la que se listan todos los archivos presentes en la carpeta seleccionada. Esta sección es importante ya que el programa realizado toma datos de esta carpeta. Por esa razón todos los archivos necesarios para trabajar se deben encontrar aquí. Ya que Matlab trabaja por carpetas es importante situar el archivo .m y los demás archivos necesarios para el funcionamiento adecuado en la misma carpeta. En el caso de la captura presentada (ver Figura 3.20) se puede observar que el nombre de la carpeta es “Proyecto cesar”. En esta carpeta se sitúan los archivos .m y los archivos de .csv importados del osciloscopio.

Name ▲	Value	Min	Max
A1	-32	-32	-32
Num1	488	488	488
Num2	489	489	489
Restas	487x3 double	0.1024	488
T	488	488	488
aux	0	0	0
aux1	0	0	0
aux2	[63.9802,3.0912]	3.0912	63.9802
c	1	1	1
d	489	489	489
i	200000	200000	200000
ind	0	0	0
k	16	16	16
mat	200000x2 double	0	63.9850
maxs	488x2 double	0.0470	63.9824
menor	3.4332	3.4332	3.4332
mfoto	200000x2 double	0	63.9997
mopto	200000x2 double	-0.1906	63.9997

Figura 3.23. *Workspace Final.m*

La Figura 3.23 es la sección workspace de Matlab. Aquí se listan todas las variables inicializadas y utilizadas por el programa. Esta figura será referenciada varias veces en este trabajo de tesis.

El funcionamiento detallado del programa consta de distintas actividades para editar las tablas importadas a y posterior procesamiento adecuado de los datos.

Al ejecutar el programa Final.m la primera actividad que se realiza es la de guardar el archivo “TEK0000” (que es la señal tomada del canal 1 del osciloscopio) en una matriz nombrada “mopto”. Dado que la instrucción csvread de matlab solo lee valores numéricos. Se indica en la misma línea de código que empiece a guardarse desde el renglón 16 (el

comando está indexado a 0, se usa 16 para iniciar en el renglón 17). De esta manera la matriz “mopto” solo contiene valores numéricos y tiene un tamaño de 200000 por 2. La Figura 3.24 conceptualiza esta actividad.

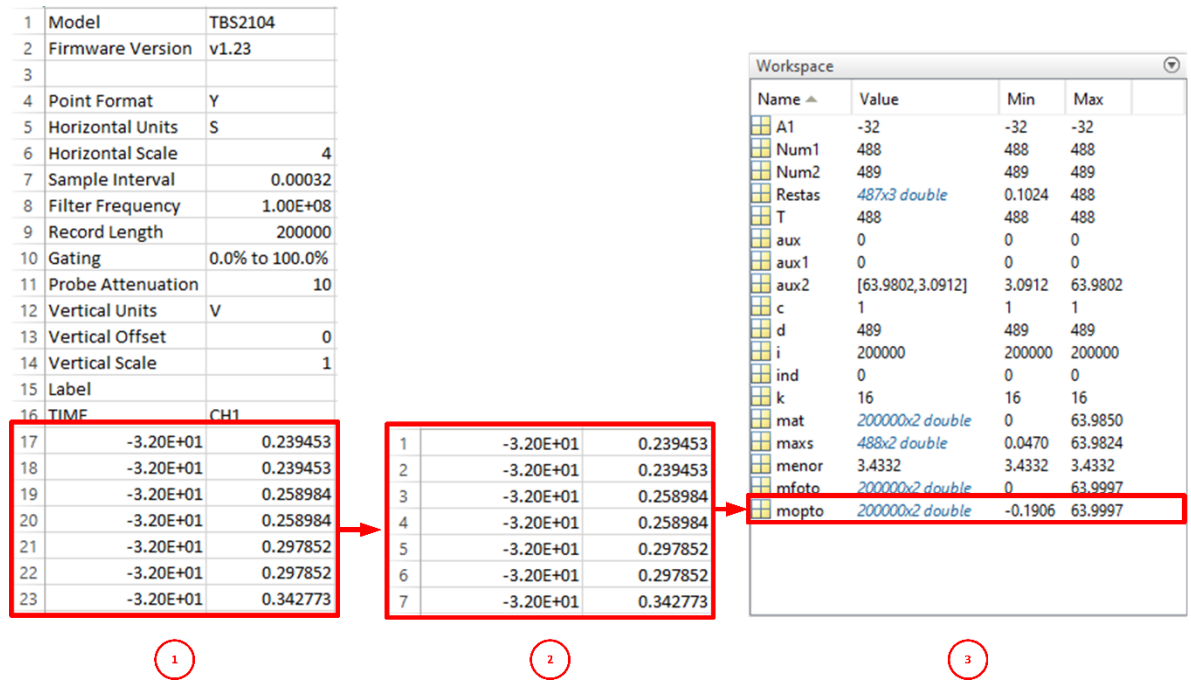


Figura 3.24. Guardado de datos en matriz ‘mopto’.

El osciloscopio TBS2000 (ver Figura 3.17) tiene una escala de tiempos con su cero en la mitad de la cuadrícula de la pantalla. Los valores que están por detrás de ese cero se cuentan como negativos por eso las tablas importadas tiene valores de tiempo negativos. Para evitar problemas al analizar los datos y los periodos de tiempo de cada señal. Se hace un ajuste de tiempo a la primera columna de la matriz ‘mopto’. Se genera una variable A1 y en ella se guarda el valor más negativo de tiempo (que está en la posición 1,1 de la matriz). Para el caso del ejemplo (ver Figura 3.23) es -32 segundos. A1 se multiplica por -1 para volverlo positivo y se le suma a todos los elementos de la columna de tiempos (columna 1) de la matriz

‘mopto’. El resultado es una columna de tiempos que inicia desde 0, lo cual facilita el procesamiento de los datos. La Figura 3.25 facilita la comprensión de este paso.

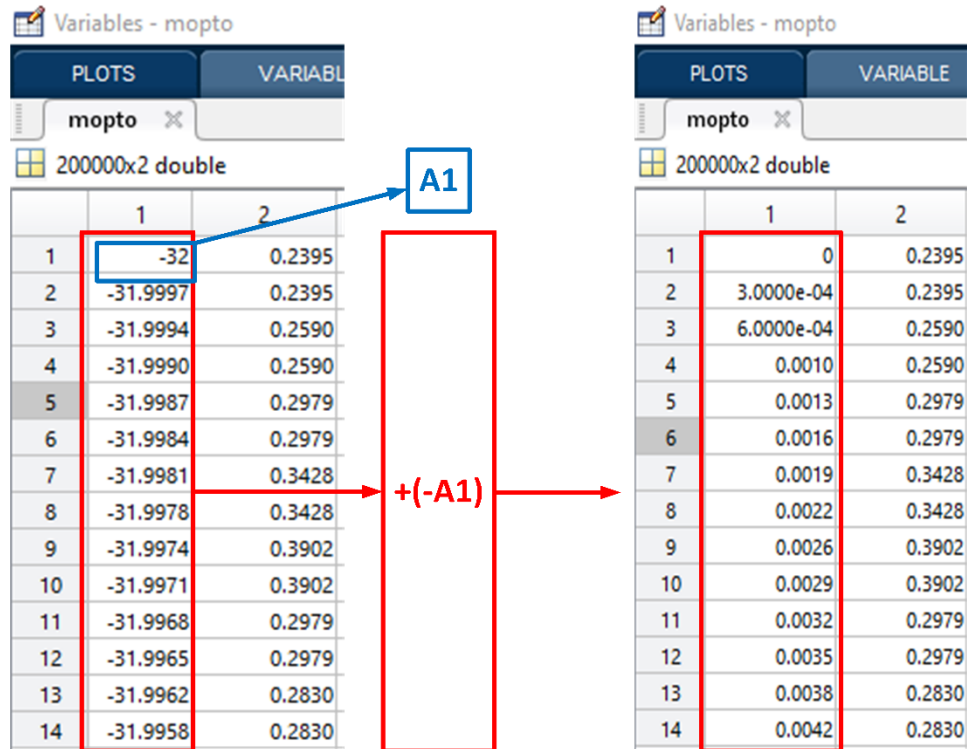


Figura 3.25. Columna de tiempo iniciada a 0.

Estas actividades se realizan con los dos archivos de Excel. La matriz generada a partir del archivo “TEK0001” es nombrada “mfoto”.

Como se puede ver en la Figura 3.18 la señal del canal 2 esta invertida. Por esta razón, la lógica de la siguiente etapa cambia un poco para cada matriz a tratar. Aun así, la secuencia de pasos es la misma.

Para la matriz “mfoto” se busca el menor valor de voltaje (columna 2) de la matriz. Con la instrucción ‘min(x)’ se guarda el valor más pequeño de la columna en una variable nombrada ‘menor’. Debido a distintos factores de ruido óptico. El valle de voltaje, cuando un objeto es detectado, no será siempre el mismo. Esto, aun cuando el objeto se encuentre en

la misma posición. Por esta razón el programa no puede buscar solo ese valor dado que se encuentra muy pocas veces o solo una vez en todos los datos tomados. Por esta razón la variable ‘menor’ se ajusta agregándole una tolerancia. Esta tolerancia se vuelve importante pues de esta forma el programa será capaz de detectar todos los valles de voltaje presentes en la matriz y de esta forma se puede calcular el ángulo de recepción en cada caso. La Figura 3.26 se observa como en menor valor de voltaje de la señal real es 2.9332 volts y se presentó en $t = 57.3728 \text{ seg}$ y es el dato 179261 de la matriz.

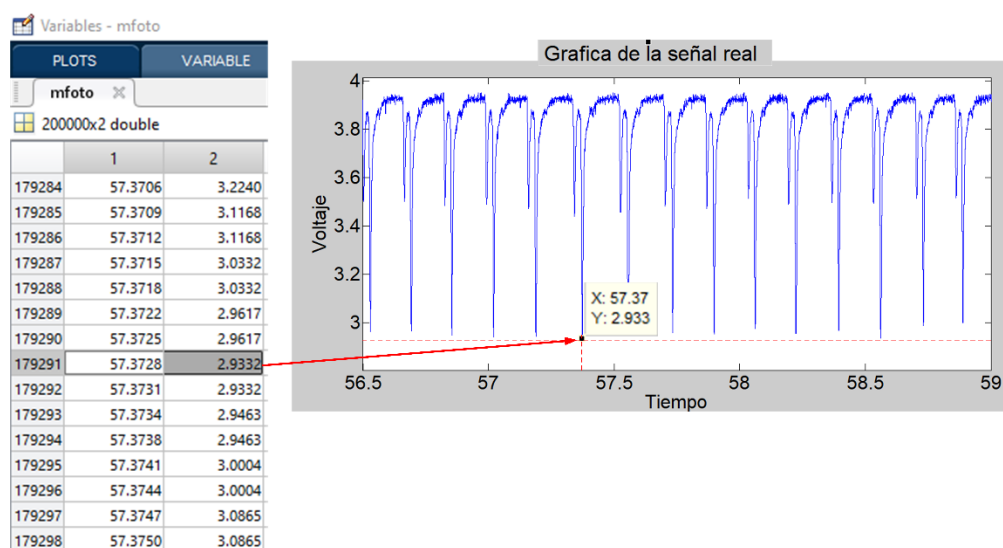


Figura 3.26. Menor valor de la señal.

Después de tener el valor (la variable ‘menor’) que será usado como límite de detección por el programa. Se genera una matriz de ceros, del mismo tamaño que la matriz “mfoto” y se nombra ‘mat’. En esta matriz se guardan todos los valores de voltaje (columna 2 de la matriz) que están por debajo del límite seleccionado. En la misma posición que tienen en la matriz “mfoto” y además se guarda su respectivo tiempo (columna 1 de la matriz). De manera que se obtiene una matriz tratada o ajustada con valores de 0.

En la siguiente etapa se genera una matriz “aux” que servirá de ayuda para guardar valores temporales en ella. El programa evalúa la matriz “mat” posición por posición en la columna de voltajes (columna dos de la matriz) en busca de valores diferentes de 0. Al encontrar un valor diferente de 0 se activa una bandera o marcador que indica que es necesario almacenar esos valores diferentes de 0 en la matriz “aux”. Cuando se vuelve a encontrar otro valor igual a 0 apaga la bandera y busca el menor valor en esa matriz auxiliar. Que como se explicó antes puede ser diferente del mínimo valor de toda la matriz “mfoto”. El menor valor de la matriz “aux” indica el primer valle de la señal de detección. Esto significa que con esos datos hará los cálculos posteriores. Este valor se guarda en una matriz llamada “maxs”, con su respectivo valor de tiempo (columna 1) proveniente de la matriz original “mfoto”. Después la matriz “aux” se borra y el proceso se repite hasta terminar evaluar “mfoto” completamente.

El resultado es una matriz “maxs” de dos columnas (tiempo y voltaje) que tiene los valores de voltaje mínimos o valles de voltaje y sus respectivos tiempos de aparición en la muestra tomada. El número de renglones de esta matriz depende del número de veces que se detectó un objeto en la operación experimental del escáner láser. Para el ejemplo tomado (ver Figura 3.23) se detectó el objeto 488 veces. Que también es el número de revoluciones que dio el espejo en la SA durante el tiempo que dura la experimentación.

Para la matriz “mopto” se realiza la misma secuencia de pasos. En este caso se hace búsqueda del valor máximo valor en la columna de voltajes con el comando max. Además, al obtener la matriz “maxs” proveniente de los datos de “mopto”. Se realiza una serie de pasos más. Primero se inicializa una matriz llamada “restas”. En esta matriz se guardan los valores de la resta de periodos de tiempo entre señales de voltaje máximo. Lo que es lo mismo

que el periodo de tiempo que le toma en cada ocasión al motor del espejo en completar una vuelta completa.

Al finalizar las matrices de resultantes se guardan con un comando en archivos de Excel en la misma carpeta donde se encuentran los originales.

La sección del programa “Busquedadeanguglo.m” se encarga de calcular el ángulo de recepción de los datos anteriores al comparar ambos archivos obtenidos. Posteriormente calcula las coordenadas cartesianas para el punto de reflexión que el sistema detecta en cada momento. Y finalmente, evalúa la ecuación (2.39) del plano de barrido. Comparando los datos reales de la configuración experimental contra los calculados y obtenidos en las mediciones. El programa se explica a continuación:

La primera acción que realiza es guardar el archivo ‘periodosopto.xlsx’ en una matriz llamada ‘opto’. El archivo ‘picosfoto.xlsx’ se almacena en una variable llamada ‘foto’. Estas acciones con ayuda del comando xlsread(x) de matlab. Se inicializa una matriz en la que se guardaran todos los datos calculados por el programa y se nombra ‘perde’. Posteriormente se llena la matriz ‘perde’ con los datos adecuados de acuerdo con la siguiente regla:

- En la primera columna: Se pone el valor resultante de la resta del valor de tiempo del segundo renglón de la columna de tiempo de la matriz ‘foto’, menos el valor de la columna de tiempo en el primer renglón de la matriz ‘opto’. Esto es, el periodo de tiempo que transcurrió desde que el espejo en la SA inicio su rotación hasta que apareció la señal de reflexión del haz de luz láser y por lo tanto apareció la señal del fototransistor.

- La segunda columna: Se guarda el valor de la segunda columna de la matriz ‘opto’ que es el periodo de tiempo que le tomo al espejo en terminar una rotación completa.
- La tercera columna: se hace el cálculo de ángulo de recepción β_{ij} correspondiente para cada caso con la ecuación (2.6). Aquí, N_A es el tiempo en que llego la señal de detección (columna 1 matriz ‘perde’) y $N_{2\pi}$ es el tiempo en que completo la revolución (columna 2 matriz ‘perde’). Por lo tanto en esta columna de la matriz ‘perde’ se encuentra el ángulo de recepción calculado por el sistema para cada iteración de experimento completo.
- Cuarta columna: se calcula la coordenada cartesiana en x para el punto de reflexión en ese momento. Con el ángulo de recepción calculado (columna 3) y el ángulo del LP (que es el mismo para todo el conjunto de mediciones). El ángulo de emisión del LP está indicado en el programa (debe cambiarse para cada caso).
- Quinta columna: se calcula la coordenada cartesiana en y para el punto de reflexión en ese momento. Con el ángulo de recepción calculado (columna 3) y el ángulo del PL (que es el mismo para todo el conjunto de mediciones). El ángulo de emisión del LP está indicado en el programa (debe cambiarse para cada caso).

NOTA: Dado que las muestras de datos tomadas en experimentación se realizaban siempre en coordenada $z = 0$ (sin inclinación del TVS), el programa no tiene una columna para calcular y almacenar la tercera coordenada.

Con los datos de la experimentación, se calcula el valor real del ángulo de recepción para la configuración experimental y se guarda en una variable nombrada ‘Areal’ este valor se usa más adelante como comparación.

- Sexta columna: se hace una primera evaluación de la ecuación del plano de barrido (2.39). Sustituyendo los valores de las coordenadas del punto y ángulo de recepción. Para comprobar que la lógica de la ecuación es correcta y que con esta sustitución de valores el resultado es cero.
- Séptima columna: aquí se realiza la evaluación de la ecuación del plano de barrido, pero en contraste con el valor real utilizando la variable 'Areal'. De esta manera se compara el valor de las coordenadas espaciales del punto de reflexión. Contra la rotación o inclinación real del plano de barrido que en ese momento es el ángulo real de recepción. La diferencia de cero en esta columna es el error absoluto medido en m que está presente en el sistema para cada medición.

Posteriormente el programa para análisis estadístico se encarga de analizar todos los datos adquiridos y guardados en la matriz 'perde' y el archivo 'datos.xlsx'.

Con la ayuda de estos programas que importan y procesan los datos adquiridos en distintas configuraciones experimentales. Además de la aplicación de la ecuación del plano de barrido, explicado en este trabajo de tesis. Se pudo realizar un completo análisis estadístico que fue utilizado para la toma de decisiones y conclusiones durante el completo estudio de maestría.

Gracias a la realización del programa anterior en Matlab, se recolectaron y analizaron los datos mostrados en este tercer capítulo. Probando ser una herramienta muy útil.

4. Análisis de los resultados

Después de realizar la experimentación con el controlador y el prototipo # 2 del TVS. Se analizarán los datos resultantes. Los datos experimentales fueron tomados en las mismas condiciones de operación en las que realizó la sección 3.2. De esta forma es posible realizar un análisis comparativo directo de los funcionamientos con y sin controlador. Por lo tanto las características de operación fueron las siguientes:

- Velocidad deseada de operación (referencia): 7.6 revoluciones por segundo (rps)
- Voltaje en la fuente: 5 V
- Ciclo de trabajo PWM promedio: 24% potencia promedio de 1.2V
- Análisis de los periodos y características de las señales.

Los datos obtenidos y el análisis de los mismos se presentan a continuación. Las gráficas presentadas son obtenidas gracias al procesamiento del programa desarrollado en el capítulo 3 del texto y de los datos obtenidos en tablas de los anexos.

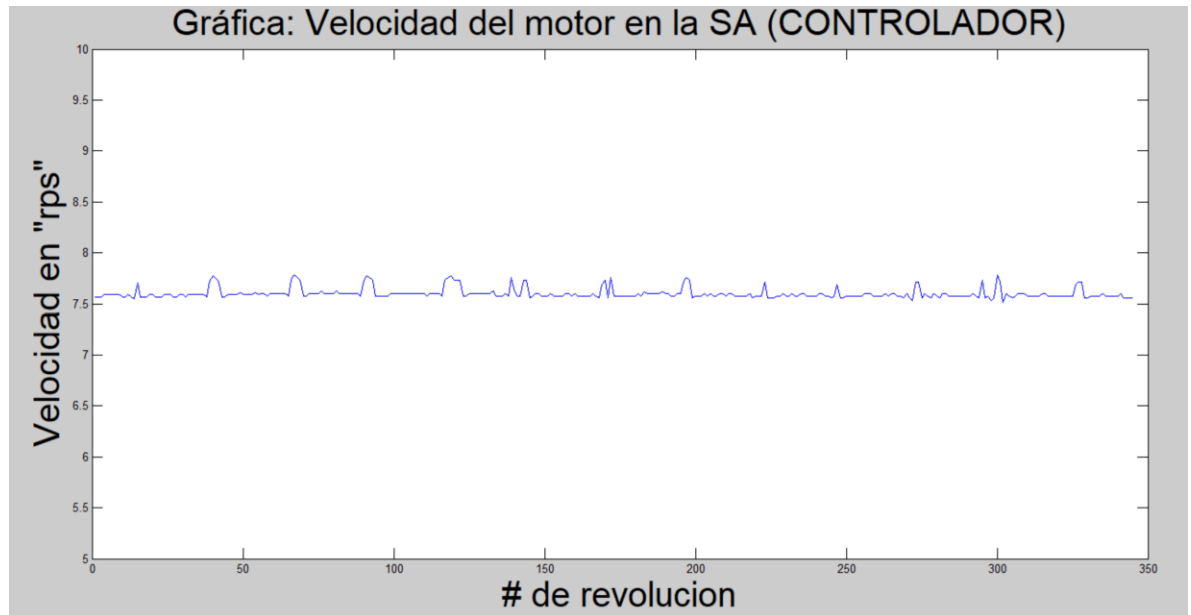


Figura 4.1. Velocidad del motor en experimentación con controlador

En la **Figura 4.1** se presenta el principal objeto de análisis, la velocidad en cada rotación completada por el motor de la apertura durante el tiempo en el cual se adquieren mediciones. De esta forma se puede aseverar que en las condiciones reales del TVS, el problema de la inestabilidad en la velocidad del motor todavía está presente. Sin embargo, al comparar las gráficas de la **Figura 3.7** en la sección 3.2 del texto y la **Figura 4.1** es observable que la inestabilidad es menor.

La Figura 4.2 muestra la gráfica de distribución de frecuencia resultante del ángulo de recepción después de implementado el esquema de control propuesto. Haciendo una comparación con la Figura 3.8 se aprecia el aumento en la precisión de cálculo del TVS.

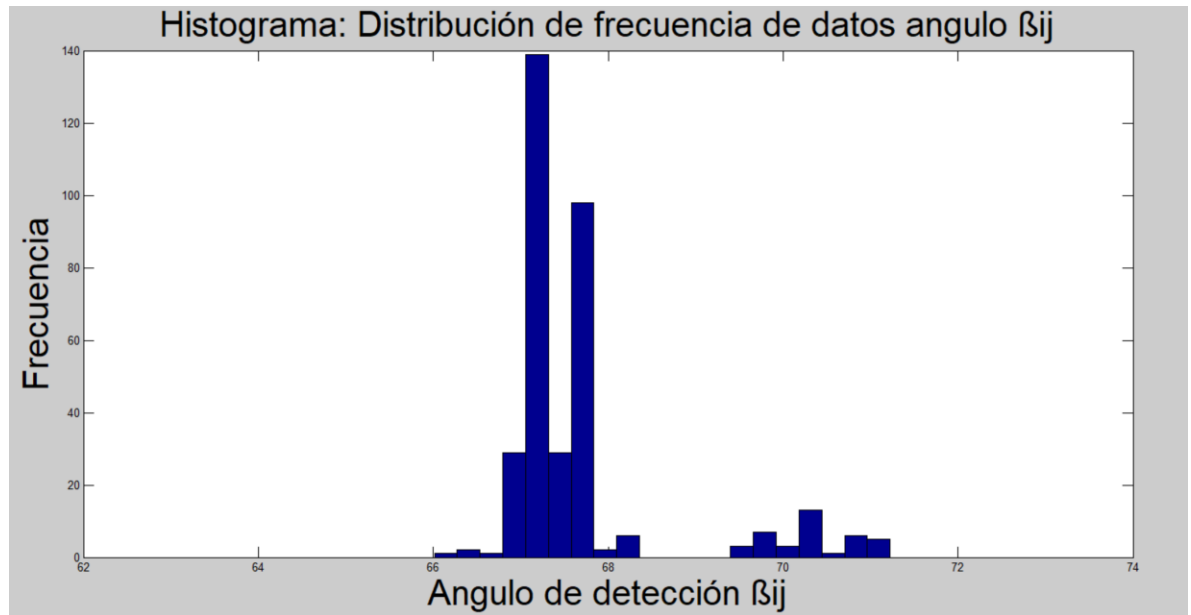


Figura 4.2 Ángulo de recepción β_{ij} calculado por el TVS operado con el controlador.

El promedio de los datos es de 67.7304° muy cercano al valor real de la configuración experimental el cual es 67.0887° . En este caso, la muestra va de 66.0150° hasta 71.2250° . Una variación de 5.21° en las mediciones, menor en comparación a la variación de la Figura 3.8 la cual era de 9.0536°

La distribución de frecuencia de la distancia calculada en x para el modo de operación con controlador se encuentra en la Figura 4.3. En este caso vemos que el rango de los datos va desde 1.0389 metros hasta 1.1705 metros. Una variación de 0.1316 metros. Al igual que en el caso del ángulo, al comparar estos datos con los de la Figura 3.9 podemos ver que este es menor ya que sin el controlador aplicado el rango de las distancias en x era de 0.2221 metros.

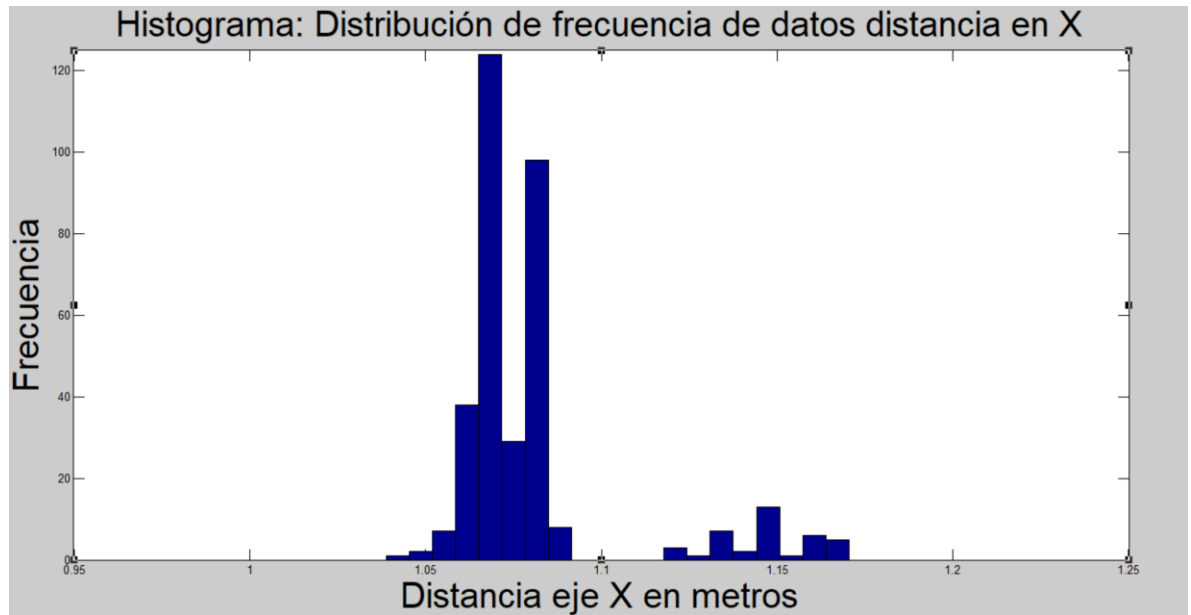


Figura 4.3. Distancia calculada en x por el TVS operando con el esquema de control.

Por último, la distribución de frecuencia resultante en la experimentación con el controlador de la distancia calculada en y se encuentra en la Figura 4.4. En este caso, el rango de datos va desde 0.3979 metros hasta 0.4622 metros, con una variación de 0.0643 metros. En comparación a los 0.1084 metros de la Figura 3.10 también se ve una mejoría.

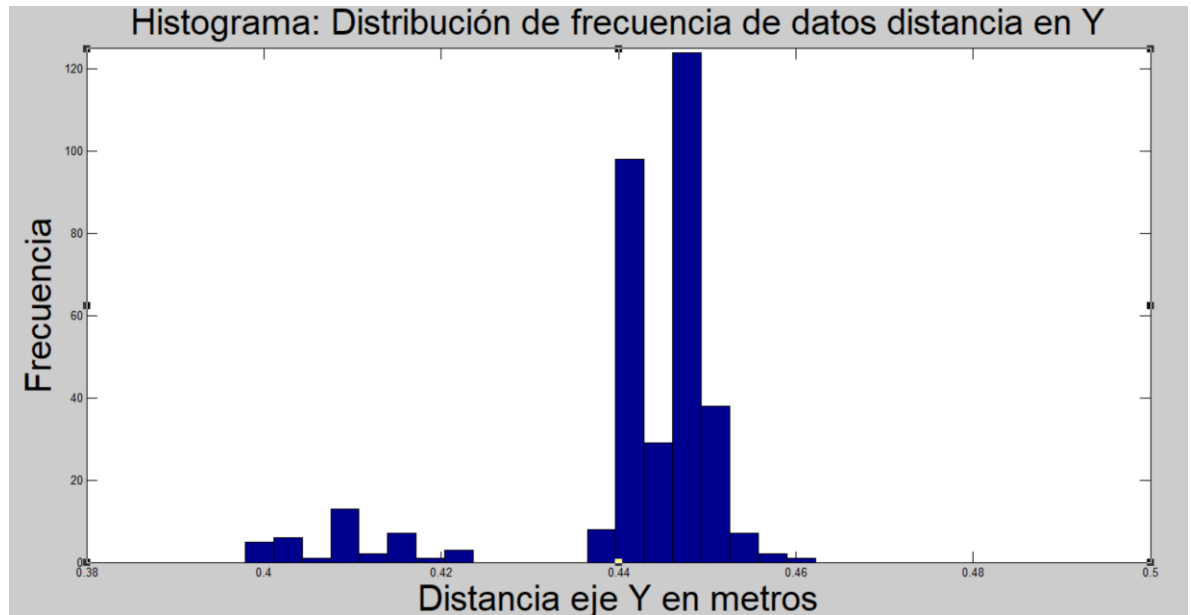


Figura 4.4. Distancia calculada en y por el TVS operando con el esquema de control.

El error absoluto en las mediciones tomadas por el TVS con el controlador se obtiene gracias a la implementación de la ecuación del plano de barrido, en la cual se evalúan las coordenadas cartesianas adquiridas en cada rotación del sistema. La Figura 4.5 presenta la distribución del error absoluto para este experimento. Los datos van desde -0.0213 hasta 0.0892. Una variación en los datos de 0.1105. Lo que significa que cualquier medición tomada por el TVS tiene ahora un error absoluto de ± 0.1105 metros. Un error promedio de 0.0134 metros.

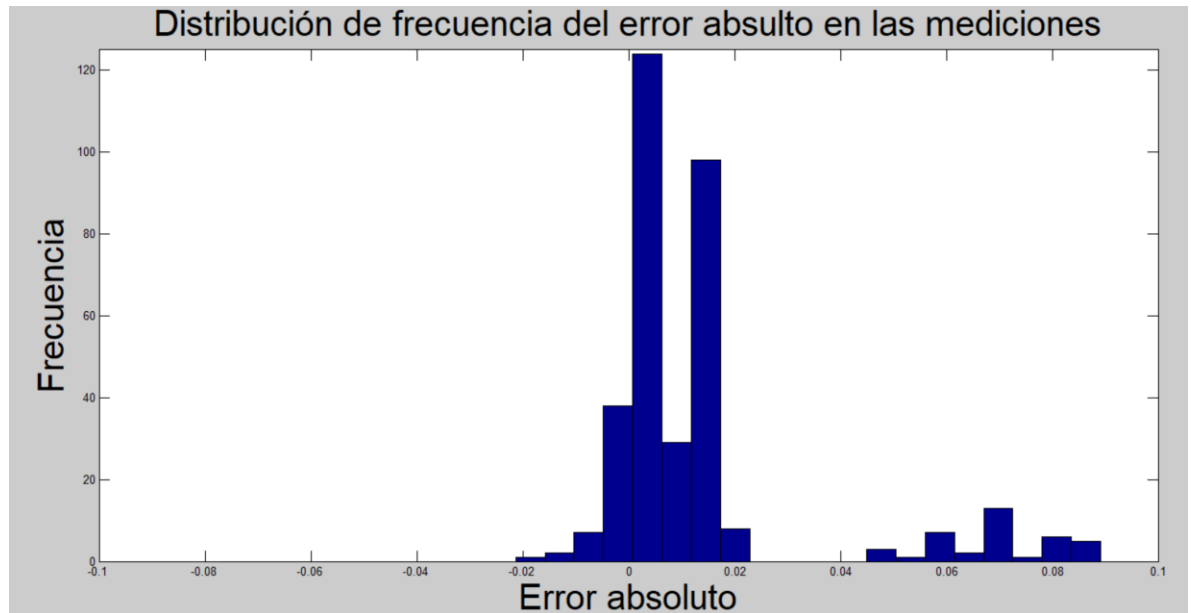


Figura 4.5. Distribución de error absoluto en las mediciones.

Después de la presentación de los primeros resultados se determina el aumento real en la resolución y precisión del TVS.

De la sección 3.2 se concluye que a velocidades de barrido bajas, la inestabilidad del motor puede hacer diferencias en periodo de tiempo de 1.1 ms en vueltas consecutivas (como se explica en la formulación del problema de este documento). En comparación con las mediciones tomadas con el motor de la SA controlado por el PID se demuestra que, al ser controlado por el esquema propuesto, las diferencias entre dos períodos consecutivos de la señal del foto transistor son ahora de 0.1 ms, es decir, el uso de las técnicas propuestas en este documento puede disminuir hasta 10 veces la inestabilidad del sistema (ver Figura 4.6).

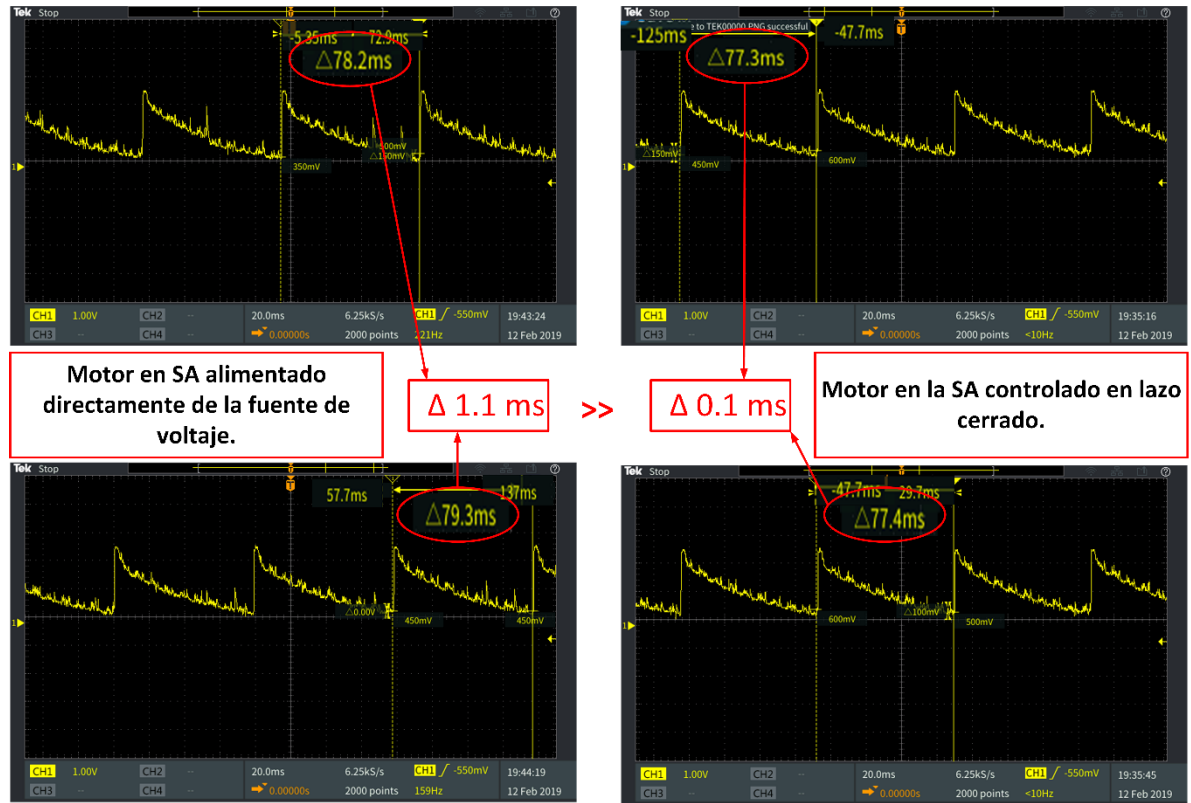


Figura 4.6. Comparación en los periodos de la señal. Funcionamiento con controlador y sin controlador.

En términos de error angular, esta diferencia de 1.1 ms de los periodos de la señal, representa un error de medición en el ángulo de 2.5° , desde la primera señal de detección hasta la consecutiva. La Figura 4.7 muestra una representación de este error de angular desde la perspectiva de la SA. Además de la cuantificación de este error a diferentes distancias de escaneo. En la figura se puede observar cómo se forman dos triángulos con las dos líneas de detección (la primera es la detección del ángulo real y la segunda es la detección del ángulo de error) y el espacio entre ellas es un ángulo conocido de 2.5° . Estos, generan un triángulo isósceles formado por: SA, punto A y punto B.

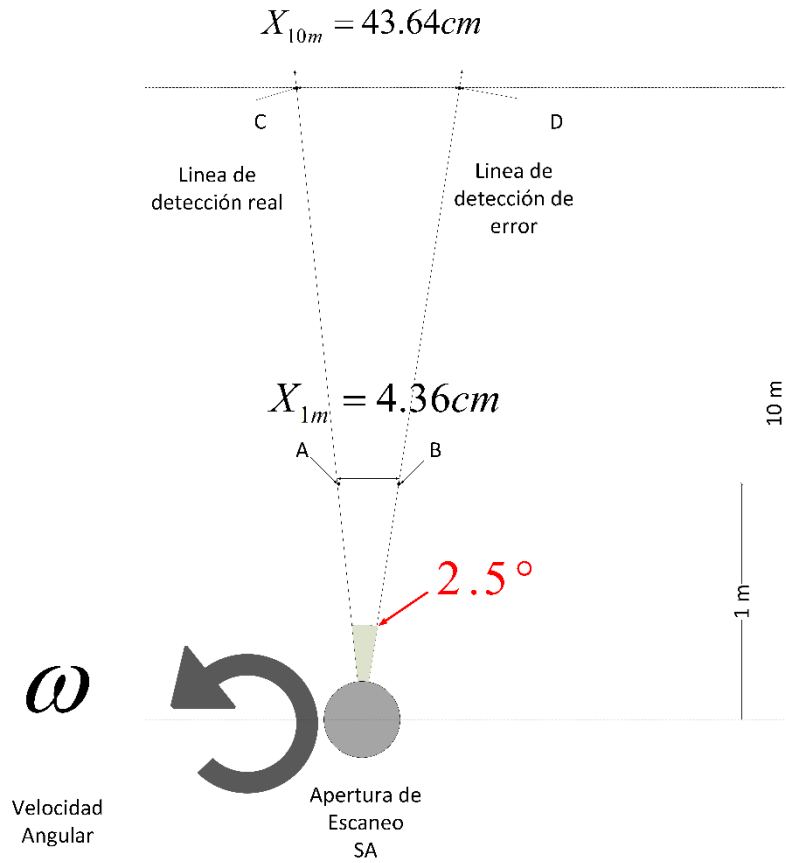


Figura 4.7. Error angular desde la perspectiva de la SA.

Los ángulos $\angle ASAB$ y $\angle CSAD$ formados entre las líneas de detección de señal y las distancia X_{1m} y X_{10m} se calculan con (2.52), lo que nos da un ángulo de 88.75° . Y ahora tenemos un triángulo con ángulos conocidos, el alto es la distancia de escaneo. Mediante funciones trigonométricas (2.54), podemos calcular la mitad de la distancia X_{1m} . Con (2.57) se calcula el error en términos geométricos de cualquier ángulo de error θ_e a cualquier distancia de escaneo X_{sd} .

$$2x + 2.5 = 180^\circ \quad (2.52)$$

$$x = \frac{180 - 2.5}{2} = 88.75^\circ \quad (2.53)$$

$$\tan(\theta) = \frac{c.o}{c.ad} \quad (2.54)$$

$$\tan(88.75) = \frac{1m}{0.5X_{1m}} \quad (2.55)$$

$$0.5X_{1m} = 0.0021m \quad (2.56)$$

$$X_{sd} = 2 \left(\frac{sd}{\tan(\theta)} \right) \quad (2.57)$$

Finalmente se obtiene un efecto de resolución en términos de coordenadas geométricas, de 4.36 cm aproximadamente más en 1 m de distancia de escaneo, y un efecto de resolución de aproximadamente 43 cm en 10 m de distancia de impacto (ver Tabla 3) en condiciones de laboratorio. En este caso distancia de escaneo significa la distancia entre el punto de reflexión láser y el centro del espejo SA con corte a 45 °.

Tabla 3. Error angular en coordenadas geométricas.

No.	Con un error angular de 2.5° en el cálculo del ángulo β_{ij}		
	Distancia de escaneo	Error (cm)	%
1	1m	4.36	4.36
2	5m	21.82	4.36
3	10m	43.64	4.36

Como conclusión de este capítulo los resultados de la experimentación muestran que, de hecho, la inestabilidad presentada en el motor DC afecta la señal de detección y, como consecuencia, aumenta la incertidumbre de la medición de coordenadas tridimensionales. El capítulo muestra la estimación de tal contribución a la incertidumbre. Este problema se puede resolver mediante la implementación de un controlador de lazo cerrado que monitorea la velocidad del motor y controla mediante el seguimiento en todo momento del error entre la velocidad real y la deseada. En el prototipo experimental se muestra que la implementación de la metodología ofrecida puede permitir un aumento de precisión de hasta un factor de 10.

En comparación a los datos de las mediciones sin el controlador es identificable que existe una mejora considerable en la calidad de las mediciones realizadas por el escáner láser con la implementación del controlador PID.

5. Conclusiones

Después de presentado el análisis de resultados obtenidos de la operación del sistema con la metodología de control propuesta se procederá a realizar las conclusiones finales de este trabajo de investigación.

La tecnología del escáner láser presentada muestra ser una novedosa idea con múltiples posibilidades de aplicación. Análisis de salud estructural de edificios, estudios biomédicos de escoliosis y navegación de robots móviles son algunas de ellas. Aun cuando ha sido ampliamente desarrollada por los investigadores, mantiene áreas de mejora. Como el análisis de ruido eléctrico y óptico de las señales del sistema, análisis de errores en las mediciones por factores físicos (exposición a condiciones ambientales cambiantes como luz, temperatura y humedad), mecánicos (restricciones por elementos que componen al sistema) y electrónicos (limitantes de los circuitos y programas implementados). Justificando así este trabajo de investigación enfocado en el análisis de error causado por un elemento electromecánico del escáner láser (motor en SA).

En base a la investigación se determina que existe una variedad de factores físicos que afectan la calidad de las mediciones tomadas por el TVS. Las condiciones de luz ambiental en la que se encuentra el escáner láser generan que la señal de recepción cambie de forma, generando una campana de gauss más estrecha y mejor definida cuando no existe ruido óptico (oscuridad) y una señal ancha y mal definida en condiciones de luz de día, además la velocidad de operación de la SA genera diferencias en los periodos calculados de las señales optoelectrónicas del escáner siendo estas diferencias más pequeñas al trabajar con velocidades de barrido más altas.

La investigación y experimentación realizada con el prototipo # 2 del TVS arrojó como resultado que la inestabilidad de velocidad en el motor de la SA puede llegar a causar un error en el ángulo de detección de hasta 2.5° que dependiendo de la distancia de escaneo al objeto bajo observación puede significar un error de hasta 40 cm con respecto a la posición real del objeto. Se comprueba con base experimental que este fenómeno afecta las mediciones a cualquier velocidad de barrido y en cualquier condición de luz. Este fenómeno se considera un hecho prometedor para trabajo de tesis ya que representa un recurso válido para disminuir el error del TVS aplicando la metodología de control propuesta para el motor DC.

El motor con escobillas DC es capaz de realizar satisfactoriamente la tarea de movimiento angular en la apertura, además debido a las condiciones o restricciones mecánicas del sistema se comprueba que no es necesaria la implementación de otro tipo de motor o algún sensor de posición extra. Basándose en ventajas/desventajas de los métodos de control investigados y con el objetivo de ampliar su utilidad y sintetizar la experiencia previa con el escáner láser, establecemos que las condiciones de inestabilidad del motor son compensadas de manera adecuada por la metodología de control propuesta mediante implementación de controlador PID en lazo cerrado.

El esquema de control propuesto logra una síntesis de las ventajas encontradas en literatura de los controladores propuestos y muestra ser útil para estabilizar la velocidad de barrido de la apertura, como se muestra en capítulo 4 basándose en análisis promedio de una velocidad de 7.6 revoluciones por segundo, que generaba periodos de revolución completa de 171 ms a diferencia de los datos que se presentan en la operación del TVS sin controlador los cuales en las mismas condiciones daban mediciones de tiempo de hasta 300 ms y

velocidades de hasta 9.55 rps. Esto representa una mayor confiabilidad de las mediciones. Además, de los datos se concluye que la implementación de tecnologías ya utilizadas en el prototipo evita incrementar el costo del mismo.

La experimentación realizada con el TVS y el esquema de control PID muestra que la implementación del mismo es beneficiosa para la obtención de mediciones del escáner láser. Se consideraron elementos de variación en el entorno experimental como son velocidad, presencia de luz y posición de los nodos. El cambio de tales factores en condiciones experimentales mostró que el sistema es más robusto a factores afectantes que se pueden presentar en un entorno de aplicación real.

Del capítulo 4 de este trabajo de investigación se concluye que los errores físicos del sistema para el cálculo del ángulo de recepción permanecen presentes. Aun en este caso la aplicación de la metodología de control propuesta genera un incremento en la confiabilidad de las mediciones reduciendo hasta 10 veces el error angular y por lo tanto la adquisición de las mismas adquiere mayor precisión.

En el apartado teórico de este texto se estableció la necesidad de una herramienta geométrica de comparación. La existencia de esta herramienta permite validar lo que pasa en la práctica (comportamientos de TVS) comparándolo con lo establecido en la teoría. Además, la existencia y validación experimental de esta herramienta permite analizar qué sucedería en condiciones que debido a sus características mecánicas o eléctricas el TVS no puede alcanzar como lo son valores de velocidad de barrido más altas, ángulos más grandes imposibles de medir por las limitaciones físicas etc. La herramienta geométrica de comparación brinda una representación rápida del error absoluto espacial de las mediciones del TVS.

En comparación con el funcionamiento anterior del sistema la operación controlada del TVS tiene un 1.1 % menos de error angular absoluto promedio y menos de error obtenido por herramienta geométrica en las mediciones obtenidas. La coincidencia comprueba la validez práctica de la ecuación del plano de barrido desarrollada. Este último dato es recolectado y generado rápidamente gracias a la aplicación del programa presentado en la sección 3 del presente trabajo.

Se puede concluir que el diseño de la propuesta de control se realizó satisfactoriamente pues las metodologías seleccionadas cumplen el propósito de estabilizar la velocidad de rotación o barrido del sistema. Así mismo, la implementación de este controlador genera un aumento del 1.5 % en la precisión de las mediciones. Además se probó la utilidad de la herramienta geométrica en el análisis comparativo del error en las mediciones.

6. Trabajos futuros

Una vez terminada la exposición de este trabajo de investigación, se enlista una serie de posibles trabajos futuros en el área tanto para investigadores de nivel doctorado como de maestría.

- Cambio adicional en la SA a un motor de DC sin escobillas que tendrá menos problemas de fricción y mejorará las características de estabilización. Comparando el funcionamiento de la propuesta en este trabajo de tesis con el nuevo elemento de la SA.
- Corroborar la utilidad de la ecuación del plano de barrido y las herramientas desarrolladas en esta investigación en aplicaciones específicas del TVS. Como ejemplo, el análisis de comportamiento del escáner láser en sistemas aislados completamente de la luz, para aplicación de exploración de ductos, minas y otros sitios de interés y de difícil acceso para el hombre.
- Desarrollar métodos de almacenamiento y disponibilidad más rápidos para la funcionalidad del TVS.
- Por último, se plantea el análisis de efecto del ruido generado por el PWM en el circuito de control. Al momento de la aplicación del escáner láser a un sistema autónomo, los sistemas computacionales se pueden ser afectados por el ruido generado por el PWM. Hecho que puede ser investigado en trabajos futuros enfocados a la eficiencia de funcionamiento del escáner.

7. Bibliografía y referencias

- Alexander, C., Erenskjold Moeslund, J., Klith Bøcher, P., Arge, L., & Svenning, J.-C. (2013, July). Airborne laser scanner (LiDAR) proxies for understory light conditions. *Remote Sensing of Environment*, 134, 152-161. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2013.02.028>
- Barr, M. (2001). Pulse width modulation. *Embedded Systems Programming*, 103-104.
- Basaca-Preciado, L., Rodriguez-Quinonez, J., Sergiyenko, O., Tyrsa, V., Hernandez, W., Nieto Hipolito, J., & Starostenko, O. (2010). 3D Laser Scanning Vision System for Autonomous Robot Navigation. *Industrial Electronics (ISIE) International Symposium Bari* (págs. 1773-1778). IEEE. Obtenido de <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=5637874>
- Basaca-Preciado, L., Sergiyenko, O., Rodriguez-Quinonez, J., & Rivas-Lopez, M. (2012). Optoelectronic 3D Laser Scanning Technical Vision System based on Dynamic Triangulation. *Photonics Conference (IPC) in Burlingame California* (pp. 648-649). IEEE. Retrieved from <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6358788>
- Chang-liang, X. (2012). *Permanent magnet brushless DC motor drives and controls*. John Wiley & Sons.
- Cole, J. A., & al, e. (2011). *Álgebra y trigonometría con geometría analítica*. Cengage Learning Editores.

- Flores-Fuentes, W., Rivas-Lopez, M., Sergiyenko, O., & Lindner, L. (2014). Barrido opto-electrónico para cuerpos macroscópicos en la infraestructura industrial. *ARGOS 2014* (pp. 145-158). Mexicali: Tecnológico Nacional de México. doi:ISBN 978-0-692-30967-4
- Flores-Fuentes, W., Rivas-Lopez, M., Sergiyenko, O., Rodríguez-Quiñonez, J. C., Hernández-Balbuena, D., & Rivera-Castillo, J. (2014). Energy center detection in light scanning sensors for structural health monitoring accuracy enhancement. *IEEE Sensors Journal*, 2355-2361.
- Fu, G., Menciassi, A., & Dario, P. (2012, October). Development of a low-cost active 3D triangulation laser scanner for indoor navigation of miniature mobile robots. *Robotics and Autonomous Systems*, 60(10), 1317-1326. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.robot.2012.06.002>
- Gamazo-Real, J. C., Vázquez-Sánchez, E., & Gómez-Gil, J. (2010). Position and speed control of brushless DC motors using sensorless techniques and application trends. *sensors*, 6901-6947.
- Haddad, N. (2011, June). From ground surveying to 3D laser scanner: A review of techniques used for spatial documentation of historic sites. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 23(2), 109-118. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jksues.2011.03.001>
- Hong-Seok, P., & Chintal, S. (2015). Development of High Speed and High Accuracy 3D Dental Intra Oral Scanner. *25th DAAAM International Symposium on Intelligent*

Manufacturing and Automation. 100, págs. 1174-1181. Elsevier.
doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.481>

Huang, G., & Lee, S. (July 2008). PC-based PID speed control in DC motor. 2008 *International Conference on Audio, Language and Image Processing. IEEE*, (pp. 400-407). Shanghai, China.

Ivanov, M., Sergiyenko, O., Tyrsa, V., Lindner, L., Reyes-García, M., Rodríguez-Quíñonez, J. C., & Hernández-Balbuena, D. (2020). Data Exchange and Task of Navigation for Robotic Group. En *Machine Vision and Navigation* (págs. 389-430). Springer.

Kennel, R. M. (2007). Encoders for Simultaneous Sensing of Position and Speed in Electrical Drives With Digital Control. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1572-1577.

Leach, R. K. (2014). *The measurement of surface texture using stylus instruments*.

Lindner, L. (2016). Laser Scanners. In O. Sergiyenko, J. Rodríguez-Quinonez, O. Sergiyenko, & J. Rodríguez-Quinonez (Eds.), *Developing and Applying Optoelectronics in Machine Vision* (p. 38). Hershey, Pennsylvania: IGI Global.
doi:10.4018/978-1-5225-0632-4.ch004

Lindner, L., Sergiyenko, O., Rivas-Lopez, M., Hernandez-Balbuena, D., Flores-Fuentes, W., Rodríguez-Quinonez, J., . . . Basaca, L. (2017). Exact laser beam positioning for measurement of vegetation vitality. *Industrial Robot: An International Journal*, 44(4), 532-541. doi:<http://www.emeraldinsight.com/doi/full/10.1108/IR-11-2016-0297>

- Lu, S., Zhang, X., & Kuang, Y. (2007). An integrated inspection method based on machine vision for solder paste depositing. *IEEE International Conference on Control and Automation*, 137-141.
- Ogata, K. (2010). *Ingeniería de Control Moderna*. (5 ed.). Pearson.
- Rairan-Antolines, J. D., & Fonseca-Gomez, J. M. (2011). Double Control Loop for Adjusting Position and Speed in a Direct Current Motor. *Ingeniería y Universidad*, 337-357.
- Reshetyuk, Y. (2010). Direct georeferencing with GPS in terrestrial laser scanning. *Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, 151-159.
- Reyes-Garcia, M., Sepulveda-Valdez, C., Sergiyenko, O., Rivas-López, M., Rodríguez-Quinonez, J. C., Flores-Fuentes, W., & Ivanov, M. (2020). Digital Control Theory Application and Signal Processing in a Laser Scanning System Applied for Mobile Robotics. En *Control and Signal Processing Applications for Mobile and Aerial Robotic Systems* (págs. 215-265). IGI Global.
- Rivas-Lopez, M., Sergiyenko, O., & Tyrsa, V. (2008). *Machine Vision: Approaches and Limitations*. InTech. Retrieved from http://cdn.intechopen.com/pdfs/5210/InTech-Machine_vision_approaches_and_limitations.pdf
- Rivera-Castillo, J., Flores-Fuentes, W., Rivas-Lopez, M., Sergiyenko, O., Gonzalez-Navarro, F., Rodriguez-Quinonez, J., . . . Basaca-Preciado, L. (2016, Dezember 2). Experimental image and range scanner datasets fusion in SHM for displacement detection. *Structural Control and Health Monitoring*, 1-17. doi:10.1002/stc.1967
- Rodriguez-Quinonez, J., Sergiyenko, O., Tyrsa, V., Basaca-Preciado, L., & Nieto-Hipolito, J. (2011). Monitoreo continuo de rehabilitación en pacientes con escoliosis utilizando

barrido laser automático. *Health Care Exchanges (PAHCE) Conference Rio de Janeiro* (págs. 410-414). IEEE. Obtenido de <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=5871941>

Sepúlveda-Valdez, C. A., Sergiyenko, O., Hernandez-Balbuena, D., Tyrsa, V., Mercorelli, P., Flores-Fuentes, W., & Melnik, V. (2019). Circular Scanning Resolution Improvement by its Velocity Close Loop Control. *IEEE 28th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)* (págs. 244-249). Vancouver, Canada: IEEE.

Sergiyenko, O., Ivanov, M., Tyrsa, V., Kartashov, V., Rivas-Lopez, M., Hernandez-Balbuena, D., . . . Tchernykh, A. (2016, July). Data transferring model determination in robotic group. *Robotics and Autonomous Systems*, 251-260. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.robot.2016.04.003>

Sergiyenko, O., Tyrsa, V., Basaca-Preciado, L., Rodriguez-Quinonez, J., Hernandez, W., Nieto-Hipolito, J., . . . Starostenko, O. (2011). Electromechanical 3D Optoelectronic Scanners: Resolution Constraints and Possible Ways of Improvement. En *Optoelectronic Devices and Properties*. InTech. doi:10.5772/14263

Sergiyenko, O., Tyrsa, V., Hernandez-Balbuena, D., Rivas-Lopez, M., & Devia-Cruz, L. (2008). Precise optical scanning for practical multi-applications. *Industrial Electronics, 2008. IECON 2008. 34th Annual Conference of IEEE* (pp. 1656-1661). Orlando: IEEE. doi:<http://dx.doi.org/10.1109/IECON.2008.4758202>

- Xiang, S., Chen, S., Wu, X., Xiao, D., & Zheng, X. (2010, February). Study on fast linear scanning for a new laser scanner. *Optics & Laser Technology*, 42(1), 42-46. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.optlastec.2009.04.019>
- Xiong, X., Adan, A., Akinci, B., & Huber, D. (2013). Automatic creation of semantically rich 3D building models from laser scanner data. *Automation in construction*, 325-337.
- Yu, G.-R. R., & Hwang, R.-C. (2004). Optimal PID speed control of brush less DC motors using LQR approach. *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, (págs. 473-478).
- Zhongdong, Y., Peng, W., Xiaohui, L., & Changku, S. (2014, March). 3D laser scanner system using high dynamic range imaging. *Optics and Lasers in Engineering*, 54, 31-41. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.optlaseng.2013.09.003>

8. Anexos

Anexo 1. Tabla de datos obtenidos en experimentación sin controlador.

# de medición	Angulo β_{ij}	Coordenada "x"	Coordenada "y"	Ecuación de plano-ideal	Ecuación de plano-real
1	67.66058684	1.078151891	0.44304896	-1.11022E-16	0.01181135
2	69.04498816	1.112762023	0.426147145	5.55112E-17	0.040857518
3	67.66058684	1.078151891	0.44304896	-5.55112E-17	0.01181135
4	68.68965517	1.103736179	0.430558344	5.55112E-17	0.033279511
5	67.25880551	1.068378881	0.447815393	-5.55112E-17	0.003615175
6	68.87892377	1.108531247	0.428215163	-5.55112E-17	0.037305114
7	66.67682927	1.054429094	0.454614506	-5.55112E-17	-0.008079826
8	68.32317073	1.094531574	0.435054365	5.55112E-17	0.025553761
9	68.68965517	1.103736179	0.430558344	5.55112E-17	0.033279511
10	69.93006993	1.135692578	0.414928742	0	0.060120424
11	69.00692841	1.111790425	0.426622114	0	0.040041663
12	68.32317073	1.094531574	0.435054365	0	0.025553761
13	68.02488336	1.087116493	0.43867447	0	0.019331696
14	69.04498816	1.112762023	0.426147145	5.55112E-17	0.040857518

15	69.76287817	1.131310853	0.417073744	5.55112E-17	0.056438328
16	68.75100725	1.1052874	0.429800393	0	0.034581737
17	68.25174825	1.092749883	0.435924348	0	0.024058593
18	67.34017364	1.070348573	0.446854955	0	0.005266873
19	67.34017364	1.070348573	0.446854955	0	0.005266873
20	68.34375	1.09504567	0.434803319	0	0.025985199
21	67.34017364	1.070348573	0.446854955	0	0.005266873
22	67.66058684	1.078151891	0.44304896	-1.11022E-16	0.01181135
23	69.21888412	1.117216207	0.423969321	0	0.044598063
24	70.7087959	1.156420032	0.404773244	5.55112E-17	0.077546353
25	69.2674316	1.118464104	0.423359064	0	0.045646128
26	68.86421862	1.108157674	0.42839774	-5.55112E-17	0.036991465
27	67.70780856	1.079308325	0.442484778	0	0.012781358
28	69.37833037	1.121321975	0.421961298	1.11022E-16	0.048046525
29	70.20332717	1.14290557	0.411396354	0	0.066182994
30	69.75	1.130974328	0.417238458	-5.55112E-17	0.05615556
31	65.97972973	1.038030381	0.462601006	0	-0.021822193
32	63	0.971441195	0.494974012	5.55112E-17	-0.077572192
33	67.34785875	1.070534856	0.446764117	0	0.005423087

34	70.94688222	1.162864648	0.40161268	0	0.082967215
35	69.57983193	1.126540705	0.419408178	0	0.052430486
36	68.125	1.089597693	0.437463305	0	0.021413531
37	68.10810811	1.089178525	0.437667929	-5.55112E-17	0.021061819
38	66.97674419	1.061587899	0.451125941	0	-0.002078722
39	67.42474916	1.072401009	0.44585406	5.55112E-17	0.006988059
40	67.6647681	1.078254221	0.442999038	5.55112E-17	0.011897182
41	68.38815789	1.096156153	0.434261017	-5.55112E-17	0.026917159
42	68.66562009	1.103129289	0.430854859	0	0.032770055
43	70.17857143	1.142249452	0.411717744	5.55112E-17	0.065631456
44	68.32317073	1.094531574	0.435054365	0	0.025553761
45	68.71956009	1.10449192	0.430189086	5.55112E-17	0.033913936
46	70.64364207	1.154665325	0.405633537	0	0.076070618
47	68.03827751	1.087448	0.438512659	-5.55112E-17	0.019609835
48	66.63461538	1.05342654	0.455102958	-5.55112E-17	-0.008920156
49	70.3125	1.145805417	0.409975734	5.55112E-17	0.068620789
50	67.56923077	1.075919321	0.444138046	0	0.009938783
51	67.03448276	1.062973391	0.450450623	0	-0.000917146
52	69.24117205	1.117788872	0.423689278	-5.55112E-17	0.045079019

53	70.44642857	1.149377082	0.408225601	0	0.071623717
54	72.05357143	1.193512282	0.386562279	0	0.108764963
55	67.26457399	1.068518362	0.447747384	-5.55112E-17	0.003732134
56	67.9245283	1.084637011	0.439884619	0	0.017251465
57	68.01213961	1.086801209	0.438828358	0	0.019067171
58	69.24117205	1.117788872	0.423689278	0	0.045079019
59	68.23351024	1.092295551	0.436146179	5.55112E-17	0.023677337
60	70.24390244	1.143982116	0.410868993	0	0.067087977
61	69.24117205	1.117788872	0.423689278	0	0.045079019
62	69.28406467	1.118892096	0.423149753	0	0.046005594
63	68.59756098	1.101413256	0.431693223	5.55112E-17	0.031329579
64	67.34411085	1.070444004	0.44680842	5.55112E-17	0.005346899
65	67.9350348	1.08489624	0.439758107	0	0.017468944
66	70.24390244	1.143982116	0.410868993	0	0.067087977
67	68.34375	1.09504567	0.434803319	0	0.025985199
68	70.56661562	1.152595761	0.40664806	0	0.07433021
69	70.24390244	1.143982116	0.410868993	0	0.067087977
70	69.55471698	1.125888406	0.419727345	-5.55112E-17	0.051882482
71	68.26666667	1.09312171	0.435742796	5.55112E-17	0.024370617

72	68.26666667	1.09312171	0.435742796	5.55112E-17	0.024370617
73	68.57142857	1.100755325	0.43201463	0	0.030777319
74	66.96428571	1.061289257	0.451271499	0	-0.002329093
75	70.37790698	1.147547749	0.409122037	0	0.070085629
76	68.45986985	1.097952644	0.433383627	5.55112E-17	0.028424914
77	70.37790698	1.147547749	0.409122037	0	0.070085629
78	69.00692841	1.111790425	0.426622114	0	0.040041663
79	68.87892377	1.108531247	0.428215163	-5.55112E-17	0.037305114
80	67.96460177	1.085626197	0.439401853	0	0.018081351
81	67.24431818	1.068028687	0.447986139	-5.55112E-17	0.003321527
82	68.77840909	1.10598119	0.429461373	-5.55112E-17	0.035164185
83	67.53138075	1.074996142	0.444588348	-5.55112E-17	0.009164505
84	70.01414427	1.137904987	0.413845452	0	0.0619798
85	70.02169197	1.138103901	0.413748048	0	0.06214698
86	66.97674419	1.061587899	0.451125941	5.55112E-17	-0.002078722
87	67.61555393	1.0770506	0.443586206	-5.55112E-17	0.010887627
88	68.26666667	1.09312171	0.435742796	5.55112E-17	0.024370617
89	68.57142857	1.100755325	0.43201463	0	0.030777319
90	69.41348974	1.12223015	0.421517061	0	0.048809374

91	68.54651163	1.100128494	0.432320832	0	0.030251176
92	70.96774194	1.163431738	0.401334499	0	0.083444285
93	69.71922246	1.130170634	0.417631816	0	0.055480263
94	70.96774194	1.163431738	0.401334499	0	0.083444285
95	68.93044129	1.109841374	0.427574827	-5.55112E-17	0.038405118
96	66.29433962	1.045390233	0.459017412	5.55112E-17	-0.015655265
97	71.04915627	1.165648864	0.400246798	-1.11022E-16	0.085309561
98	71.08108108	1.166519919	0.399819419	-5.55112E-17	0.086042427
99	69.00692841	1.111790425	0.426622114	0	0.040041663
100	69.92412747	1.135536431	0.415005192	5.55112E-17	0.059989199
101	67.65661253	1.078054638	0.443096405	0	0.011729776
102	70.17857143	1.142249452	0.411717744	-5.55112E-17	0.065631456
103	68.28528073	1.093585888	0.435516146	5.55112E-17	0.024760145
104	66.29433962	1.045390233	0.459017412	5.55112E-17	-0.015655265
105	68.34375	1.09504567	0.434803319	0	0.025985199
106	66.97017268	1.06143036	0.451202726	0	-0.002210797
107	70.62068966	1.15404808	0.405936133	5.55112E-17	0.07555153
108	65.94594595	1.037244018	0.46298382	5.55112E-17	-0.022481029
109	64.86251809	1.012421595	0.475060817	5.55112E-17	-0.043271523

110	70.01414427	1.137904987	0.413845452	0	0.0619798
111	70.21908127	1.143323388	0.411191685	-5.55112E-17	0.066534223
112	71.5629742	1.179783126	0.393308562	0	0.097204545
113	69.55471698	1.125888406	0.419727345	-5.55112E-17	0.051882482
114	68.03827751	1.087448	0.438512659	5.55112E-17	0.019609835
115	66.97017268	1.06143036	0.451202726	0	-0.002210797
116	68.02488336	1.087116493	0.43867447	0	0.019331696
117	67.9245283	1.084637011	0.439884619	-5.55112E-17	0.017251465
118	66.98315467	1.061741607	0.451051023	0	-0.001949857
119	68.68965517	1.103736179	0.430558344	5.55112E-17	0.033279511
120	69.87111448	1.134144774	0.415686516	-5.55112E-17	0.058819691
121	66.67682927	1.054429094	0.454614506	-5.55112E-17	-0.008079826
122	66.37329287	1.047247779	0.458112748	0	-0.014098612
123	65.72501878	1.032120362	0.465477753	0	-0.02677345
124	68.23351024	1.092295551	0.436146179	0	0.023677337
125	68.68965517	1.103736179	0.430558344	-5.55112E-17	0.033279511
126	69.23076923	1.117521532	0.423820013	0	0.04485449
127	66.375	1.04728799	0.458093164	-5.55112E-17	-0.014064914
128	69.24117205	1.117788872	0.423689278	5.55112E-17	0.045079019

129	67.34785875	1.070534856	0.446764117	0	0.005423087
130	67.9245283	1.084637011	0.439884619	0	0.017251465
131	66.67682927	1.054429094	0.454614506	-5.55112E-17	-0.008079826
132	67.65283019	1.077962093	0.443141552	5.55112E-17	0.011652152
133	67.34785875	1.070534856	0.446764117	0	0.005423087
134	68.01213961	1.086801209	0.438828358	-5.55112E-17	0.019067171
135	67.98406375	1.08610704	0.43916717	0	0.018484767
136	67.05603788	1.063491237	0.450198202	-5.55112E-17	-0.000482981
137	67.66058684	1.078151891	0.44304896	-5.55112E-17	0.01181135
138	67.42857143	1.072493889	0.445808763	-5.55112E-17	0.007065951
139	67.99672935	1.086420121	0.439014363	5.55112E-17	0.018747438
140	67.36842105	1.071033487	0.446520961	5.55112E-17	0.005841235
141	66.69975186	1.054974013	0.454349007	5.55112E-17	-0.007623072
142	69.42229455	1.12245774	0.42140573	-5.55112E-17	0.049000549
143	69.37351308	1.121197623	0.422022123	5.55112E-17	0.047942074
144	67.04453441	1.063214834	0.450332934	5.55112E-17	-0.000714721
145	68.42975207	1.097197662	0.433752365	-5.55112E-17	0.027791264
146	68.48635236	1.098617082	0.433059097	0	0.028982585
147	65.89420655	1.036041191	0.463569348	5.55112E-17	-0.023488765

148	64.15540541	0.996620195	0.482742353	5.55112E-17	-0.056500382
149	67.03241895	1.062923828	0.450474782	0	-0.000958701
150	68.10810811	1.089178525	0.437667929	-5.55112E-17	0.021061819
151	66.71221178	1.055270366	0.454204612	-5.55112E-17	-0.007374665
152	67.36480687	1.070945822	0.446563711	0	0.005767719
153	67.8125	1.08187808	0.441230953	0	0.014936971
154	67.4611399	1.073285727	0.445422581	0	0.007730022
155	65.89420655	1.036041191	0.463569348	5.55112E-17	-0.023488765
156	66.72038678	1.055464864	0.454109845	5.55112E-17	-0.007211633
157	65.9362224	1.037017831	0.463093929	5.55112E-17	-0.022670533
158	68.86421862	1.108157674	0.42839774	-5.55112E-17	0.036991465
159	66.37213254	1.047220449	0.458126059	0	-0.014121516
160	65.61432059	1.029565216	0.466721248	0	-0.028913861
161	66.97017268	1.06143036	0.451202726	0	-0.002210797
162	63.94924663	0.992070349	0.484953348	5.55112E-17	-0.060308734
163	65.04320503	1.016508967	0.473073051	0	-0.039848883
164	66.65625	1.053940194	0.454852705	0	-0.00848962
165	67.66058684	1.078151891	0.44304896	-5.55112E-17	0.01181135
166	64.53947368	1.005164689	0.478589189	0	-0.049347498

167	66.66666667	1.054187625	0.454732154	5.55112E-17	-0.008282225
168	64.93765586	1.014118814	0.474235468	0	-0.04185036
169	67.36842105	1.071033487	0.446520961	0	0.005841235
170	64.8676345	1.012537053	0.475004672	0	-0.043174846
171	65.28497409	1.022010441	0.470397047	-5.55112E-17	-0.035241626
172	66.80412371	1.057459806	0.453137766	0	-0.005539379
173	70.2	1.142817356	0.411439565	0	0.066108841
174	67.6142132	1.077017835	0.443602189	-5.55112E-17	0.010860146
175	70.51546392	1.151224324	0.407320273	0	0.073176968
176	67.15025907	1.065758731	0.449092839	-5.55112E-17	0.001418178
177	67.95918367	1.085492384	0.439467161	0	0.017969086
178	66.80412371	1.057459806	0.453137766	5.55112E-17	-0.005539379
179	66.46153846	1.049329004	0.457099049	0	-0.012354421
180	66.12244898	1.041360811	0.46097954	5.55112E-17	-0.019031722
181	67.5	1.074231551	0.444961277	-5.55112E-17	0.008523252
182	66.80412371	1.057459806	0.453137766	0	-0.005539379
183	65.78680203	1.033549957	0.46478196	5.55112E-17	-0.025575841
184	66.6	1.052605371	0.455503019	5.55112E-17	-0.009608432
185	63.33333333	0.978626235	0.491484568	-5.55112E-17	-0.07156006

186	64.17391304	0.997029895	0.482543243	0	-0.056157435
187	64.61538462	1.006864156	0.477762983	5.55112E-17	-0.04792467
188	68.57142857	1.100755325	0.43201463	0	0.030777319
189	67.59825328	1.076627908	0.4437924	5.55112E-17	0.010533096
190	67.89473684	1.083902414	0.440243117	-5.55112E-17	0.016635185
191	68.97196262	1.11089884	0.427057943	-5.55112E-17	0.03929302
192	67.9245283	1.084637011	0.439884619	-5.55112E-17	0.017251465
193	67.6056338	1.076808203	0.443704451	-5.55112E-17	0.010684317
194	68.72727273	1.104686945	0.430093794	0	0.034077656
195	70.04524887	1.138725039	0.413443879	-5.55112E-17	0.062669034
196	70	1.137532358	0.414027919	-5.55112E-17	0.06166662
197	67.17703349	1.066404237	0.448778141	-5.55112E-17	0.00195942
198	68.2464455	1.092617758	0.435988859	5.55112E-17	0.023947719
199	67.6056338	1.076808203	0.443704451	-5.55112E-17	0.010684317
200	67.17703349	1.066404237	0.448778141	-5.55112E-17	0.00195942
201	71.26903553	1.171667242	0.397293363	0	0.090373651
202	69.79591837	1.132174882	0.416650822	0	0.057164352
203	69.09090909	1.11393586	0.425573271	0	0.04184323
204	69.5049505	1.124597397	0.42035899	0	0.050797928

205	68.82352941	1.107124896	0.42890247	0	0.036124374
206	67.72277228	1.079675124	0.442305822	0	0.013089033
207	66.40776699	1.048060196	0.457717058	0	-0.01341777
208	67.9245283	1.084637011	0.439884619	0	0.017251465
209	66.85714286	1.058725479	0.452520987	0	-0.004478384
210	67.9245283	1.084637011	0.439884619	0	0.017251465
211	68.2464455	1.092617758	0.435988859	5.55112E-17	0.023947719
212	68.2464455	1.092617758	0.435988859	5.55112E-17	0.023947719
213	69.29577465	1.119193546	0.423002323	-5.55112E-17	0.046258782
214	68.89952153	1.109054808	0.427959275	-5.55112E-17	0.037744699
215	67.5	1.074231551	0.444961277	5.55112E-17	0.008523252
216	67.5	1.074231551	0.444961277	0	0.008523252
217	70.3255814	1.146153583	0.409805149	0	0.068913497
218	68.97196262	1.11089884	0.427057943	0	0.03929302
219	69.62264151	1.127653794	0.418863516	0	0.053365634
220	68.2464455	1.092617758	0.435988859	5.55112E-17	0.023947719
221	68.97196262	1.11089884	0.427057943	-5.55112E-17	0.03929302
222	68.65116279	1.10276446	0.431033103	0	0.032463802
223	70.28571429	1.145092972	0.410324783	-5.55112E-17	0.068021839

224	68.89952153	1.109054808	0.427959275	5.55112E-17	0.037744699
225	65.60747664	1.029407507	0.466797994	0	-0.029045967
226	67.70642202	1.079274346	0.442501356	0	0.012752855
227	68.2464455	1.092617758	0.435988859	5.55112E-17	0.023947719
228	70.24390244	1.143982116	0.410868993	0	0.067087977
229	66.73170732	1.055734276	0.453978574	0	-0.006985805
230	67.5	1.074231551	0.444961277	5.55112E-17	0.008523252
231	66.22641509	1.043795565	0.459793982	-5.55112E-17	-0.016991561
232	66.54028436	1.051190714	0.456192179	5.55112E-17	-0.010794115
233	67.6056338	1.076808203	0.443704451	-5.55112E-17	0.010684317
234	68.65116279	1.10276446	0.431033103	0	0.032463802
235	67.9245283	1.084637011	0.439884619	0	0.017251465
236	70.28571429	1.145092972	0.410324783	5.55112E-17	0.068021839
237	69.29577465	1.119193546	0.423002323	-5.55112E-17	0.046258782
238	67.17703349	1.066404237	0.448778141	-5.55112E-17	0.00195942
239	68.82352941	1.107124896	0.42890247	0	0.036124374
240	68.82352941	1.107124896	0.42890247	0	0.036124374
241	66.6	1.052605371	0.455503019	-5.55112E-17	-0.009608432
242	68.05970149	1.08797853	0.438253698	-5.55112E-17	0.020054964

243	68.74371859	1.105102958	0.429890518	5.55112E-17	0.034426897
244	68.89952153	1.109054808	0.427959275	-5.55112E-17	0.037744699
245	69.29577465	1.119193546	0.423002323	-5.55112E-17	0.046258782
246	67.17703349	1.066404237	0.448778141	-5.55112E-17	0.00195942
247	69.56521739	1.126161064	0.419593936	0	0.052111544
248	66.85714286	1.058725479	0.452520987	0	-0.004478384
249	65.30232558	1.022406712	0.47020427	5.55112E-17	-0.034909743
250	68.89952153	1.109054808	0.427959275	0	0.037744699
251	69.09090909	1.11393586	0.425573271	-5.55112E-17	0.04184323
252	66.93467337	1.060579862	0.451617248	-5.55112E-17	-0.002923815
253	70.24390244	1.143982116	0.410868993	0	0.067087977
254	69.375	1.121236004	0.42200335	0	0.047974312
255	68.57142857	1.100755325	0.43201463	0	0.030777319
256	64.08376963	0.995036345	0.483512064	0	-0.057826146
257	65.94059406	1.037119516	0.463044428	0	-0.02258534
258	68.82352941	1.107124896	0.42890247	0	0.036124374
259	67.72277228	1.079675124	0.442305822	5.55112E-17	0.013089033
260	68.82352941	1.107124896	0.42890247	-5.55112E-17	0.036124374
261	64.47761194	1.003782366	0.479261175	-5.55112E-17	-0.050504769

262	65.61576355	1.029598471	0.466705065	0	-0.028886004
263	68.48780488	1.098653541	0.433041289	5.55112E-17	0.029013185
264	67.05882353	1.063558184	0.450165568	-5.55112E-17	-0.000426852
265	67.05882353	1.063558184	0.450165568	5.55112E-17	-0.000426852
266	66.85714286	1.058725479	0.452520987	0	-0.004478384
267	68.72727273	1.104686945	0.430093794	-5.55112E-17	0.034077656
268	68.10810811	1.089178525	0.437667929	-5.55112E-17	0.021061819
269	68.72727273	1.104686945	0.430093794	0	0.034077656
270	66.66666667	1.054187625	0.454732154	-5.55112E-17	-0.008282225
271	68.33333333	1.094785408	0.434930413	-5.55112E-17	0.025766782
272	67.6142132	1.077017835	0.443602189	-5.55112E-17	0.010860146
273	70.10526316	1.14030963	0.412667853	0	0.064000904
274	68.30769231	1.094145118	0.435243076	0	0.025229446
275	66.26865672	1.044786904	0.459311227	5.55112E-17	-0.016160847
276	68.82352941	1.107124896	0.42890247	-5.55112E-17	0.036124374
277	69.95260664	1.136285036	0.414638665	0	0.060618328
278	70.24390244	1.143982116	0.410868993	0	0.067087977
279	66.08695652	1.040531296	0.461383425	0	-0.019726771
280	69.5049505	1.124597397	0.42035899	0	0.050797928

281	67.6142132	1.077017835	0.443602189	0	0.010860146
282	67.15025907	1.065758731	0.449092839	0	0.001418178
283	68.65979381	1.102982243	0.430926702	0	0.032646619
284	65.625	1.029811369	0.466601461	1.11022E-16	-0.028707668
285	66.46153846	1.049329004	0.457099049	0	-0.012354421
286	67.27272727	1.068715547	0.447651239	5.55112E-17	0.003897482
287	68.30769231	1.094145118	0.435243076	0	0.025229446
288	67.5	1.074231551	0.444961277	5.55112E-17	0.008523252
289	68.65979381	1.102982243	0.430926702	0	0.032646619
290	67.85340314	1.082884313	0.440739945	0	0.015781087
291	69.01554404	1.112010265	0.426514647	-5.55112E-17	0.040226261
292	68.21052632	1.091723355	0.436425549	0	0.023197185
293	67.85340314	1.082884313	0.440739945	0	0.015781087
294	67.15025907	1.065758731	0.449092839	-5.55112E-17	0.001418178
295	68.30769231	1.094145118	0.435243076	0	0.025229446
296	66.80412371	1.057459806	0.453137766	0	-0.005539379
297	66.12244898	1.041360811	0.46097954	5.55112E-17	-0.019031722
298	66.46153846	1.049329004	0.457099049	0	-0.012354421
299	65.96858639	1.037770921	0.462727317	-5.55112E-17	-0.022039578

300	67.37967914	1.071306624	0.446387764	0	0.006070287
301	67.74193548	1.080145106	0.442076519	5.55112E-17	0.013483265
302	67.0212766	1.062656287	0.450605191	-5.55112E-17	-0.001183006
303	68.21052632	1.091723355	0.436425549	-5.55112E-17	0.023197185
304	68.21052632	1.091723355	0.436425549	-5.55112E-17	0.023197185
305	68.57142857	1.100755325	0.43201463	5.55112E-17	0.030777319
306	67.74193548	1.080145106	0.442076519	0	0.013483265
307	67.85340314	1.082884313	0.440739945	0	0.015781087
308	65.10638298	1.017942996	0.472375576	-5.55112E-17	-0.038647998
309	68.21052632	1.091723355	0.436425549	0	0.023197185
310	69.61325967	1.127409726	0.418982948	5.55112E-17	0.05316058
311	66.74157303	1.055969138	0.453864135	5.55112E-17	-0.006788935
312	66.97674419	1.061587899	0.451125941	0	-0.002078722
313	68.57142857	1.100755325	0.43201463	-5.55112E-17	0.030777319
314	68.46625767	1.098112862	0.433305373	0	0.028559386
315	65.85365854	1.035099785	0.464027595	-5.55112E-17	-0.02427746
316	66.82634731	1.057990087	0.452879358	0	-0.005094857
317	67.22891566	1.067656537	0.448167588	0	0.003009472
318	65.25	1.021212295	0.470785316	5.55112E-17	-0.035910076

319	64	0.993188107	0.484410206	5.55112E-17	-0.059373168
320	66.12244898	1.041360811	0.46097954	5.55112E-17	-0.019031722
321	65.45454545	1.025891403	0.468508906	0	-0.031991132
322	66.08695652	1.040531296	0.461383425	0	-0.019726771
323	65.45454545	1.025891403	0.468508906	-5.55112E-17	-0.031991132
324	66.08695652	1.040531296	0.461383425	0	-0.019726771
325	64.22535211	0.998169671	0.481989306	0	-0.055203351
326	67.40895772	1.072017394	0.446041143	0	0.006666349
327	67.24431818	1.068028687	0.447986139	-5.55112E-17	0.003321527
328	65.40697674	1.02480083	0.469039517	5.55112E-17	-0.03290457
329	67.27007299	1.068651349	0.447682542	-5.55112E-17	0.003843649
330	64.73444613	1.009536828	0.476463537	5.55112E-17	-0.045686956
331	65.98607889	1.038178252	0.462529018	0	-0.021698302
332	69.28406467	1.118892096	0.423149753	-5.55112E-17	0.046005594
333	67.34017364	1.070348573	0.446854955	-5.55112E-17	0.005266873
334	67.25880551	1.068378881	0.447815393	5.55112E-17	0.003615175
335	66.96428571	1.061289257	0.451271499	0	-0.002329093
336	68.84671533	1.107713242	0.428614943	-5.55112E-17	0.036618329
337	68.24891462	1.092679277	0.435958822	5.55112E-17	0.023999343

338	67.61555393	1.0770506	0.443586206	5.55112E-17	0.010887627
339	67.91451732	1.084390086	0.440005126	0	0.017044309
340	68.26666667	1.09312171	0.435742796	-5.55112E-17	0.024370617
341	67.9350348	1.08489624	0.439758107	0	0.017468944
342	67.66058684	1.078151891	0.44304896	-5.55112E-17	0.01181135
343	66.66666667	1.054187625	0.454732154	5.55112E-17	-0.008282225
344	66.34615385	1.046608794	0.458423957	5.55112E-17	-0.0146341
345	68.79352227	1.106364097	0.42927426	5.55112E-17	0.035485647
346	64.24342105	0.998570417	0.481794536	0	-0.05486789
347	66.02870813	1.039171776	0.462045331	-5.55112E-17	-0.020865878
348	66.26294821	1.044652864	0.459376502	0	-0.01627317
349	67.05603788	1.063491237	0.450198202	-5.55112E-17	-0.000482981
350	68.36538462	1.095586484	0.434539219	-5.55112E-17	0.026439067
351	65.35122336	1.023524474	0.469660487	0	-0.033973585
352	64.6875	1.008481942	0.476976436	-5.55112E-17	-0.046570182
353	68.36538462	1.095586484	0.434539219	0	0.026439067
354	68.45500849	1.097830733	0.43344317	1.11022E-16	0.028322594
355	64.8676345	1.012537053	0.475004672	0	-0.043174846
356	65.26315789	1.02151248	0.470639288	0	-0.035658671

357	66.02870813	1.039171776	0.462045331	5.55112E-17	-0.020865878
358	70.8340081	1.159802932	0.403114385	-5.55112E-17	0.0803917
359	68.38815789	1.096156153	0.434261017	-5.55112E-17	0.026917159
360	65.63535912	1.030050211	0.46648523	0	-0.028507598
361	66.29370629	1.04537535	0.45902466	0	-0.015667737
362	70.24390244	1.143982116	0.410868993	0	0.067087977
363	67.34785875	1.070534856	0.446764117	0	0.005423087
364	67.91451732	1.084390086	0.440005126	0	0.017044309
365	68.32317073	1.094531574	0.435054365	5.55112E-17	0.025553761
366	65.98607889	1.038178252	0.462529018	5.55112E-17	-0.021698302
367	70.03125	1.138355866	0.413624663	0	0.06235875
368	67.42857143	1.072493889	0.445808763	-5.55112E-17	0.007065951
369	67.9350348	1.08489624	0.439758107	-5.55112E-17	0.017468944
370	67.65661253	1.078054638	0.443096405	5.55112E-17	0.011729776
371	71.03393844	1.165233981	0.400450349	0	0.084960507
372	67.98406375	1.08610704	0.43916717	0	0.018484767
373	69.42857143	1.122620027	0.421326343	1.11022E-16	0.04913687
374	66.63461538	1.05342654	0.455102958	-5.55112E-17	-0.008920156
375	67.6647681	1.078254221	0.442999038	5.55112E-17	0.011897182

376	66.26294821	1.044652864	0.459376502	0	-0.01627317
377	66.02870813	1.039171776	0.462045331	5.55112E-17	-0.020865878
378	68.02488336	1.087116493	0.43867447	5.55112E-17	0.019331696
379	67.98406374	1.08610704	0.43916717	0	0.018484767
380	67.04453441	1.063214834	0.450332934	0	-0.000714721
381	64.92753623	1.013890025	0.47434673	0	-0.04204194
382	69.18566775	1.1163635	0.424386291	0	0.043881931
383	69.47368421	1.123787362	0.420755284	0	0.050117457
384	65.23690773	1.020913717	0.470930561	0	-0.036160133
385	66.95652174	1.061103202	0.451362181	0	-0.002485073
386	66.34615385	1.046608794	0.458423957	5.55112E-17	-0.0146341
387	66.02870813	1.039171776	0.462045331	5.55112E-17	-0.020865878
388	65.58359621	1.028857458	0.467065662	-5.55112E-17	-0.029506716
389	66.375	1.04728799	0.458093164	-5.55112E-17	-0.014064914
390	67.05603788	1.063491237	0.450198202	-5.55112E-17	-0.000482981
391	69.70451011	1.129786733	0.417819704	-5.55112E-17	0.0551577
392	71.71314741	1.183961069	0.391256317	0	0.100721845
393	66.72038678	1.055464864	0.454109845	-5.55112E-17	-0.007211633
394	64.25498008	0.998826885	0.481669887	-5.55112E-17	-0.054653201

395	66.375	1.04728799	0.458093164	-5.55112E-17	-0.014064914
396	65.71428571	1.031872268	0.465598498	-5.55112E-17	-0.026981282
397	67.9350348	1.08489624	0.439758107	0	0.017468944
398	67.65661253	1.078054638	0.443096405	5.55112E-17	0.011729776
399	66.98315467	1.061741607	0.451051023	0	-0.001949857
400	66.37329287	1.047247779	0.458112748	5.55112E-17	-0.014098612
401	68.36538462	1.095586484	0.434539219	0	0.026439067
402	65.35122336	1.023524474	0.469660487	5.55112E-17	-0.033973585
403	66.65625	1.053940194	0.454852705	0	-0.00848962
404	65.32924962	1.023021983	0.469904949	0	-0.034394439
405	65.76669112	1.033084336	0.465008585	5.55112E-17	-0.025965908
406	66.96428571	1.061289257	0.451271499	0	-0.002329093
407	67.9049676	1.084154608	0.440120043	0	0.016846758
408	66.69642857	1.054894989	0.45438751	1.11022E-16	-0.007689312
409	66.05747973	1.039843021	0.461718529	0	-0.020303464
410	64.18195158	0.997207906	0.48245673	5.55112E-17	-0.056008427
411	64.53563715	1.005078892	0.478630899	5.55112E-17	-0.049419327
412	64.58213256	1.006119285	0.478125113	0	-0.048548297
413	65.98240469	1.038092677	0.462570678	0	-0.021769999

414	68.57142857	1.100755325	0.43201463	-5.55112E-17	0.030777319
415	67.3192111	1.06984067	0.447102623	0	0.004840958
416	65.38116592	1.024209696	0.469327118	0	-0.033399679
417	66.4	1.047877088	0.457806243	0	-0.013571224
418	65.73466476	1.032343393	0.465369206	5.55112E-17	-0.026586614
419	63.98286938	0.992810663	0.484593617	5.55112E-17	-0.059689092
420	67.81512605	1.081942644	0.441199449	0	0.014991133
421	68.24891462	1.092679277	0.435958822	5.55112E-17	0.023999343
422	69.55471698	1.125888406	0.419727345	-5.55112E-17	0.051882482
423	65.0304878	1.016220614	0.473213293	-5.55112E-17	-0.040090351
424	66.72038678	1.055464864	0.454109845	5.55112E-17	-0.007211633
425	66.29370629	1.04537535	0.45902466	0	-0.015667737
426	64.73444613	1.009536828	0.476463537	-5.55112E-17	-0.045686956
427	67.61555393	1.0770506	0.443586206	0	0.010887627
428	66.34989201	1.046696778	0.458381106	-1.11022E-16	-0.014560367
429	69.46441673	1.12354742	0.420872667	0	0.049915897
430	65.01850481	1.015949003	0.473345392	5.55112E-17	-0.040317798
431	67.57850663	1.076145724	0.444027609	0	0.010128673
432	65.75	1.032698096	0.465196572	0	-0.026289473

433	69	1.111613681	0.426708513	0	0.039893254
434	67.5	1.074231551	0.444961277	5.55112E-17	0.008523252
435	67.5	1.074231551	0.444961277	0	0.008523252
436	66.61417323	1.052941497	0.455339266	0	-0.009326704
437	65.65756824	1.030562505	0.466235922	0	-0.028078462
438	69.26470588	1.11839399	0.423393353	-5.55112E-17	0.04558724
439	64.053076	0.994358656	0.483841391	-5.55112E-17	-0.058393396
440	65.12019231	1.018256781	0.472222954	-5.55112E-17	-0.038385223
441	63.36633663	0.97934106	0.491137371	0	-0.070961889
442	67.3901248	1.071560132	0.446264138	5.55112E-17	0.006282881
443	67.6142132	1.077017835	0.443602189	-5.55112E-17	0.010860146
444	71.56886228	1.179946533	0.393228307	-5.55112E-17	0.097342102
445	68.71732523	1.104435417	0.430216694	-5.55112E-17	0.033866503
446	67.725	1.079729745	0.442279173	5.55112E-17	0.01313485
447	66.66666667	1.054187625	0.454732154	5.55112E-17	-0.008282225
448	65.3952927	1.024533182	0.469169735	0	-0.033128741
449	65.6445993	1.030263313	0.466381525	5.55112E-17	-0.028329088
450	66.12244898	1.041360811	0.46097954	-5.55112E-17	-0.019031722
451	68.6381323	1.102435777	0.431193684	5.55112E-17	0.032187896

452	67.18052738	1.06648851	0.448737056	1.11022E-16	0.002030081
453	69.81818182	1.132757611	0.416365577	5.55112E-17	0.057654018
454	67.57679181	1.076103864	0.444048028	-5.55112E-17	0.010093564
455	68.9673913	1.11078235	0.427114885	0	0.039195207
456	68.13489332	1.089843295	0.437343408	0	0.02161961
457	69.0376569	1.112574778	0.426238682	-5.55112E-17	0.040700286
458	70.47479912	1.150135708	0.407853814	0	0.072261594
459	68.45986985	1.097952644	0.433383627	5.55112E-17	0.028424914
460	69.16129032	1.115738273	0.42469201	5.55112E-17	0.043356856
461	65.17680339	1.019544403	0.471596644	0	-0.037306902
462	66.05729877	1.039838798	0.461720585	0	-0.020307003
463	68.44384303	1.097550801	0.433579891	-5.55112E-17	0.028087649
464	65.43192813	1.02537269	0.468761286	-5.55112E-17	-0.032425597
465	68.46473029	1.09807455	0.433324086	0	0.02852723
466	66.70438472	1.055084191	0.454295324	0	-0.00753072
467	67.27007299	1.068651349	0.447682542	-5.55112E-17	0.003843649
468	66.37329287	1.047247779	0.458112748	-5.55112E-17	-0.014098612
469	67.56756757	1.075878732	0.444157844	0	0.009904741
470	67.61555393	1.0770506	0.443586206	5.55112E-17	0.010887627

471	65.78158458	1.033429133	0.464840767	5.55112E-17	-0.025677059
472	66.90909091	1.059967508	0.45191569	-5.55112E-17	-0.003437174
473	63.046875	0.9724478	0.494485192	-5.55112E-17	-0.076729947
474	65.82446809	1.034422745	0.464357145	-5.55112E-17	-0.024844662
475	65.00328299	1.015604109	0.473513129	0	-0.040606609
476	65.19685039	1.020000863	0.471374609	-5.55112E-17	-0.036924631
477	65.01347709	1.015835069	0.473400803	0	-0.040413205
478	67.25	1.068166012	0.447919183	0	0.003436678
479	69.7715549	1.131537668	0.416962726	0	0.056628913
480	66.02264151	1.039030312	0.462114203	0	-0.020984405
481	64.6875	1.008481942	0.476976436	5.55112E-17	-0.046570182
482	65.0304878	1.016220614	0.473213293	5.55112E-17	-0.040090351
483	66.37329287	1.047247779	0.458112748	-5.55112E-17	-0.014098612
484	67.25880551	1.068378881	0.447815393	-1.11022E-16	0.003615175
485	68.87892377	1.108531247	0.428215163	5.55112E-17	0.037305114
486	66.37329287	1.047247779	0.458112748	-5.55112E-17	-0.014098612

Anexo 2 . Tabla de datos obtenidos en experimentación con controlador.

# de medición	Angulo β_{ij}	Coordenada "x"	Coordenada "y"	Ecuación de plano-ideal	Ecuación de plano-real
1	67.08864589	1.06427525	0.449816024	0	-3.46745E-07
2	67.08864589	1.06427525	0.449816024	0	-3.46745E-07
3	67.08864589	1.06427525	0.449816024	5.55112E-17	-3.46745E-07
4	67.49245905	1.074047923	0.445050839	0	0.008193468
5	67.55982525	1.075689817	0.444249994	-5.55112E-17	0.009570333
6	67.49245905	1.074047923	0.445050839	0	0.008193468
7	67.49245905	1.074047923	0.445050839	5.55112E-17	0.008193468
8	67.49245905	1.074047923	0.445050839	0	0.008193468
9	67.49245905	1.074047923	0.445050839	0	0.008193468
10	67.08864589	1.06427525	0.449816024	0	-3.46745E-07
11	67.02140763	1.062659433	0.450603657	0	-0.00135489
12	67.55982525	1.075689817	0.444249994	-5.55112E-17	0.009570333
13	67.02140763	1.062659433	0.450603657	0	-0.00135489
14	66.6854899	1.054634933	0.454514216	0	-0.008080926
15	69.72525059	1.130327984	0.417554805	0	0.055430473
16	67.08864589	1.06427525	0.449816024	5.55112E-17	-3.46745E-07

17	67.02140763	1.062659433	0.450603657	0	-0.00135489
18	67.08864589	1.06427525	0.449816024	5.55112E-17	-3.46745E-07
19	67.49245905	1.074047923	0.445050839	0	0.008193468
20	67.49245905	1.074047923	0.445050839	0	0.008193468
21	67.08864589	1.06427525	0.449816024	0	-3.46745E-07
22	67.08864589	1.06427525	0.449816024	5.55112E-17	-3.46745E-07
23	67.08864589	1.06427525	0.449816024	0	-3.46745E-07
24	67.49245905	1.074047923	0.445050839	0	0.008193468
25	67.55982525	1.075689817	0.444249994	-5.55112E-17	0.009570333
26	67.49245905	1.074047923	0.445050839	0	0.008193468
27	67.08864589	1.06427525	0.449816024	0	-3.46745E-07
28	67.08864589	1.06427525	0.449816024	5.55112E-17	-3.46745E-07
29	67.49245905	1.074047923	0.445050839	0	0.008193468
30	67.49245905	1.074047923	0.445050839	0	0.008193468
31	67.08864589	1.06427525	0.449816024	5.55112E-17	-3.46745E-07
32	67.49245905	1.074047923	0.445050839	0	0.008193468
33	67.49245905	1.074047923	0.445050839	0	0.008193468
34	67.55982525	1.075689817	0.444249994	-5.55112E-17	0.009570333
35	67.49245905	1.074047923	0.445050839	0	0.008193468

36	67.49245905	1.074047923	0.445050839	0	0.008193468
37	67.49245905	1.074047923	0.445050839	0	0.008193468
38	67.08864589	1.06427525	0.449816024	0	-3.46745E-07
39	70.13337483	1.141052947	0.412303797	0	0.064442515
40	71.01994252	1.164852599	0.400637458	-5.55112E-17	0.08445383
41	70.54216844	1.151940013	0.406969485	5.55112E-17	0.073594398
42	70.13337483	1.141052947	0.412303797	0	0.064442515
43	67.08864589	1.06427525	0.449816024	0	-3.46745E-07
44	67.08864589	1.06427525	0.449816024	0	-3.46745E-07
45	67.49245905	1.074047923	0.445050839	0	0.008193468
46	67.49245905	1.074047923	0.445050839	0	0.008193468
47	67.55982525	1.075689817	0.444249994	-5.55112E-17	0.009570333
48	67.49245905	1.074047923	0.445050839	0	0.008193468
49	67.96440714	1.08562139	0.439404199	-5.55112E-17	0.017900258
50	67.49245905	1.074047923	0.445050839	5.55112E-17	0.008193468
51	67.49245905	1.074047923	0.445050839	0	0.008193468
52	67.49245905	1.074047923	0.445050839	0	0.008193468
53	67.49245905	1.074047923	0.445050839	0	0.008193468
54	67.96440714	1.08562139	0.439404199	-5.55112E-17	0.017900258

55	67.49245905	1.074047923	0.445050839	0	0.008193468
56	67.69461257	1.078984996	0.442642522	5.55112E-17	0.012333822
57	67.69461257	1.078984996	0.442642522	5.55112E-17	0.012333822
58	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
59	67.69461257	1.078984996	0.442642522	5.55112E-17	0.012333822
60	67.76203371	1.080638314	0.441835878	5.55112E-17	0.013720476
61	67.76203371	1.080638314	0.441835878	5.55112E-17	0.013720476
62	67.69461257	1.078984996	0.442642522	5.55112E-17	0.012333822
63	67.69461257	1.078984996	0.442642522	5.55112E-17	0.012333822
64	67.69461257	1.078984996	0.442642522	5.55112E-17	0.012333822
65	67.29047022	1.069144824	0.447441925	5.55112E-17	0.004082211
66	70.33768786	1.146475935	0.40964721	0	0.069000723
67	71.22498308	1.170457885	0.397886941	0	0.089169527
68	70.81507019	1.159290372	0.403365753	0	0.079775366
69	70.33768786	1.146475935	0.40964721	0	0.069000723
70	67.29047022	1.069144824	0.447441925	5.55112E-17	0.004082211
71	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
72	67.69461257	1.078984996	0.442642522	5.55112E-17	0.012333822
73	67.76203371	1.080638314	0.441835878	5.55112E-17	0.013720476

74	67.76203371	1.080638314	0.441835878	5.55112E-17	0.013720476
75	67.69461257	1.078984996	0.442642522	5.55112E-17	0.012333822
76	68.16694574	1.090639509	0.436954703	-5.55112E-17	0.022110094
77	67.69461257	1.078984996	0.442642522	5.55112E-17	0.012333822
78	67.69461257	1.078984996	0.442642522	5.55112E-17	0.012333822
79	67.69461257	1.078984996	0.442642522	5.55112E-17	0.012333822
80	67.76203371	1.080638314	0.441835878	5.55112E-17	0.013720476
81	68.16694574	1.090639509	0.436954703	-5.55112E-17	0.022110094
82	67.69461257	1.078984996	0.442642522	5.55112E-17	0.012333822
83	67.76203371	1.080638314	0.441835878	5.55112E-17	0.013720476
84	67.69461257	1.078984996	0.442642522	5.55112E-17	0.012333822
85	67.69461257	1.078984996	0.442642522	0	0.012333822
86	67.69461257	1.078984996	0.442642522	5.55112E-17	0.012333822
87	67.76203371	1.080638314	0.441835878	5.55112E-17	0.013720476
88	67.69461257	1.078984996	0.442642522	5.55112E-17	0.012333822
89	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
90	70.33768786	1.146475935	0.40964721	0	0.069000723
91	71.15661752	1.168584634	0.39880627	-5.55112E-17	0.087593458
92	70.74681677	1.157445762	0.404270303	-5.55112E-17	0.078224058

93	70.33768786	1.146475935	0.40964721	0	0.069000723
94	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
95	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
96	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
97	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
98	67.29047022	1.069144824	0.447441925	5.55112E-17	0.004082211
99	67.69461257	1.078984996	0.442642522	5.55112E-17	0.012333822
100	67.76203371	1.080638314	0.441835878	5.55112E-17	0.013720476
101	67.76203371	1.080638314	0.441835878	5.55112E-17	0.013720476
102	67.69461257	1.078984996	0.442642522	5.55112E-17	0.012333822
103	67.69461257	1.078984996	0.442642522	5.55112E-17	0.012333822
104	67.69461257	1.078984996	0.442642522	5.55112E-17	0.012333822
105	67.69461257	1.078984996	0.442642522	5.55112E-17	0.012333822
106	67.69461257	1.078984996	0.442642522	5.55112E-17	0.012333822
107	67.76203371	1.080638314	0.441835878	0	0.013720476
108	67.76203371	1.080638314	0.441835878	5.55112E-17	0.013720476
109	67.69461257	1.078984996	0.442642522	5.55112E-17	0.012333822
110	67.69461257	1.078984996	0.442642522	5.55112E-17	0.012333822
111	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211

112	67.69461257	1.078984996	0.442642522	0	0.012333822
113	67.69461257	1.078984996	0.442642522	5.55112E-17	0.012333822
114	67.76203371	1.080638314	0.441835878	5.55112E-17	0.013720476
115	67.76203371	1.080638314	0.441835878	5.55112E-17	0.013720476
116	67.29047022	1.069144824	0.447441925	5.55112E-17	0.004082211
117	70.33768786	1.146475935	0.40964721	0	0.069000723
118	70.74681677	1.157445762	0.404270303	-5.55112E-17	0.078224058
119	71.15661752	1.168584634	0.39880627	-5.55112E-17	0.087593458
120	70.33768786	1.146475935	0.40964721	0	0.069000723
121	70.26956491	1.144663735	0.410535072	-5.55112E-17	0.067477405
122	70.33768786	1.146475935	0.40964721	0	0.069000723
123	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
124	67.29047022	1.069144824	0.447441925	5.55112E-17	0.004082211
125	67.76203371	1.080638314	0.441835878	5.55112E-17	0.013720476
126	67.76203371	1.080638314	0.441835878	5.55112E-17	0.013720476
127	67.76203371	1.080638314	0.441835878	5.55112E-17	0.013720476
128	67.76203371	1.080638314	0.441835878	0	0.013720476
129	67.69461257	1.078984996	0.442642522	0	0.012333822
130	67.69461257	1.078984996	0.442642522	5.55112E-17	0.012333822

131	67.69461257	1.078984996	0.442642522	5.55112E-17	0.012333822
132	67.76203371	1.080638314	0.441835878	5.55112E-17	0.013720476
133	68.16694574	1.090639509	0.436954703	-5.55112E-17	0.022110094
134	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
135	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
136	67.29047022	1.069144824	0.447441925	5.55112E-17	0.004082211
137	67.70809533	1.079315353	0.442481349	0	0.01261089
138	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
139	70.76046596	1.157814307	0.404089587	0	0.078533995
140	68.15343803	1.090303868	0.437118562	5.55112E-17	0.021828495
141	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
142	67.29047022	1.069144824	0.447441925	5.55112E-17	0.004082211
143	70.32406178	1.14611313	0.40982497	5.55112E-17	0.068695745
144	70.32406178	1.14611313	0.40982497	5.55112E-17	0.068695745
145	66.86011024	1.058796376	0.452486437	0	-0.004593046
146	67.29047022	1.069144824	0.447441925	5.55112E-17	0.004082211
147	67.72157883	1.079645863	0.442320098	5.55112E-17	0.012888089
148	67.72157883	1.079645863	0.442320098	0	0.012888089
149	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211

150	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
151	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
152	67.72157883	1.079645863	0.442320098	0	0.012888089
153	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
154	67.29047022	1.069144824	0.447441925	5.55112E-17	0.004082211
155	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
156	67.29047022	1.069144824	0.447441925	5.55112E-17	0.004082211
157	67.72157883	1.079645863	0.442320098	0	0.012888089
158	67.72157883	1.079645863	0.442320098	0	0.012888089
159	67.29047022	1.069144824	0.447441925	5.55112E-17	0.004082211
160	67.72157883	1.079645863	0.442320098	0	0.012888089
161	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
162	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
163	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
164	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
165	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
166	67.72157883	1.079645863	0.442320098	0	0.012888089
167	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
168	66.86011024	1.058796376	0.452486437	0	-0.004593046

169	69.45353882	1.123265873	0.421010401	-5.55112E-17	0.04949817
170	70.32406178	1.14611313	0.40982497	5.55112E-17	0.068695745
171	66.86011024	1.058796376	0.452486437	0	-0.004593046
172	70.76046596	1.157814307	0.404089587	0	0.078533995
173	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
174	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
175	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
176	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
177	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
178	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
179	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
180	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
181	67.72157883	1.079645863	0.442320098	0	0.012888089
182	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
183	68.15343803	1.090303868	0.437118562	-5.55112E-17	0.021828495
184	67.72157883	1.079645863	0.442320098	0	0.012888089
185	67.72157883	1.079645863	0.442320098	0	0.012888089
186	67.72157883	1.079645863	0.442320098	0	0.012888089
187	67.72157883	1.079645863	0.442320098	0	0.012888089

188	67.72157883	1.079645863	0.442320098	0	0.012888089
189	68.15343803	1.090303868	0.437118562	-5.55112E-17	0.021828495
190	67.72157883	1.079645863	0.442320098	0	0.012888089
191	67.72157883	1.079645863	0.442320098	0	0.012888089
192	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
193	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
194	67.72157883	1.079645863	0.442320098	0	0.012888089
195	67.72157883	1.079645863	0.442320098	0	0.012888089
196	69.88842007	1.134598804	0.41546424	0	0.059018766
197	70.76046596	1.157814307	0.404089587	0	0.078533995
198	70.32406178	1.14611313	0.40982497	5.55112E-17	0.068695745
199	66.86011024	1.058796376	0.452486437	0	-0.004593046
200	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
201	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
202	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
203	67.72157883	1.079645863	0.442320098	0	0.012888089
204	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
205	67.72157883	1.079645863	0.442320098	0	0.012888089
206	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211

207	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
208	67.72157883	1.079645863	0.442320098	0	0.012888089
209	67.72157883	1.079645863	0.442320098	0	0.012888089
210	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
211	67.72157883	1.079645863	0.442320098	0	0.012888089
212	67.72157883	1.079645863	0.442320098	0	0.012888089
213	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
214	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
215	67.29047022	1.069144824	0.447441925	5.55112E-17	0.004082211
216	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
217	67.29047022	1.069144824	0.447441925	5.55112E-17	0.004082211
218	67.72157883	1.079645863	0.442320098	0	0.012888089
219	66.86011024	1.058796376	0.452486437	0	-0.004593046
220	67.29047022	1.069144824	0.447441925	5.55112E-17	0.004082211
221	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
222	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
223	69.88842007	1.134598804	0.41546424	0	0.059018766
224	66.86011024	1.058796376	0.452486437	0	-0.004593046
225	66.86011024	1.058796376	0.452486437	0	-0.004593046

226	66.86011024	1.058796376	0.452486437	0	-0.004593046
227	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
228	67.29047022	1.069144824	0.447441925	5.55112E-17	0.004082211
229	67.72157883	1.079645863	0.442320098	0	0.012888089
230	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
231	67.29047022	1.069144824	0.447441925	5.55112E-17	0.004082211
232	67.72157883	1.079645863	0.442320098	0	0.012888089
233	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
234	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
235	67.72157883	1.079645863	0.442320098	0	0.012888089
236	67.72157883	1.079645863	0.442320098	0	0.012888089
237	67.29047022	1.069144824	0.447441925	5.55112E-17	0.004082211
238	67.29047022	1.069144824	0.447441925	5.55112E-17	0.004082211
239	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
240	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
241	67.76203371	1.080638314	0.441835878	5.55112E-17	0.013720476
242	67.76203371	1.080638314	0.441835878	5.55112E-17	0.013720476
243	67.29047022	1.069144824	0.447441925	5.55112E-17	0.004082211
244	67.29047022	1.069144824	0.447441925	5.55112E-17	0.004082211

245	66.88698585	1.059438764	0.452173376	-5.55112E-17	-0.004054597
246	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
247	69.45353882	1.123265873	0.421010401	0	0.04949817
248	66.81980231	1.05783388	0.452955479	0	-0.005399791
249	66.88698585	1.059438764	0.452173376	-5.55112E-17	-0.004054597
250	67.29047022	1.069144824	0.447441925	5.55112E-17	0.004082211
251	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
252	67.29047022	1.069144824	0.447441925	5.55112E-17	0.004082211
253	67.29047022	1.069144824	0.447441925	5.55112E-17	0.004082211
254	67.29047022	1.069144824	0.447441925	5.55112E-17	0.004082211
255	67.29047022	1.069144824	0.447441925	5.55112E-17	0.004082211
256	67.69461257	1.078984996	0.442642522	5.55112E-17	0.012333822
257	67.69461257	1.078984996	0.442642522	0	0.012333822
258	67.69461257	1.078984996	0.442642522	5.55112E-17	0.012333822
259	67.29047022	1.069144824	0.447441925	5.55112E-17	0.004082211
260	67.29047022	1.069144824	0.447441925	5.55112E-17	0.004082211
261	67.29047022	1.069144824	0.447441925	5.55112E-17	0.004082211
262	67.29047022	1.069144824	0.447441925	5.55112E-17	0.004082211
263	67.69461257	1.078984996	0.442642522	5.55112E-17	0.012333822

264	67.29047022	1.069144824	0.447441925	5.55112E-17	0.004082211
265	67.69461257	1.078984996	0.442642522	5.55112E-17	0.012333822
266	67.76203371	1.080638314	0.441835878	0	0.013720476
267	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
268	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
269	66.88698585	1.059438764	0.452173376	0	-0.004054597
270	67.69461257	1.078984996	0.442642522	5.55112E-17	0.012333822
271	66.88698585	1.059438764	0.452173376	5.55112E-17	-0.004054597
272	66.41708355	1.04827989	0.457610053	0	-0.013406585
273	69.86121773	1.133885237	0.415813573	5.55112E-17	0.058419197
274	69.86121773	1.133885237	0.415813573	-5.55112E-17	0.058419197
275	66.81980231	1.05783388	0.452955479	0	-0.005399791
276	67.69461257	1.078984996	0.442642522	5.55112E-17	0.012333822
277	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
278	66.88698585	1.059438764	0.452173376	5.55112E-17	-0.004054597
279	67.76203371	1.080638314	0.441835878	5.55112E-17	0.013720476
280	67.29047022	1.069144824	0.447441925	5.55112E-17	0.004082211
281	66.81980231	1.05783388	0.452955479	0	-0.005399791
282	67.76203371	1.080638314	0.441835878	5.55112E-17	0.013720476

283	67.69461257	1.078984996	0.442642522	5.55112E-17	0.012333822
284	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
285	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
286	67.29047022	1.069144824	0.447441925	5.55112E-17	0.004082211
287	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
288	67.29047022	1.069144824	0.447441925	5.55112E-17	0.004082211
289	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
290	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
291	67.29047022	1.069144824	0.447441925	5.55112E-17	0.004082211
292	67.69461257	1.078984996	0.442642522	5.55112E-17	0.012333822
293	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
294	66.81980231	1.05783388	0.452955479	0	-0.005399791
295	70.26956491	1.144663735	0.410535072	0	0.067477405
296	66.88698585	1.059438764	0.452173376	0	-0.004054597
297	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
298	66.41708355	1.04827989	0.457610053	0	-0.013406585
299	66.81980231	1.05783388	0.452955479	0	-0.005399791
300	71.22498308	1.170457885	0.397886941	0	0.089169527
301	69.86121773	1.133885237	0.415813573	5.55112E-17	0.058419197

302	66.0150193	1.038852609	0.462200717	0	-0.021305183
303	67.69461257	1.078984996	0.442642522	5.55112E-17	0.012333822
304	67.29047022	1.069144824	0.447441925	5.55112E-17	0.004082211
305	66.88698585	1.059438764	0.452173376	0	-0.004054597
306	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
307	67.76203371	1.080638314	0.441835878	5.55112E-17	0.013720476
308	67.69461257	1.078984996	0.442642522	5.55112E-17	0.012333822
309	67.69461257	1.078984996	0.442642522	5.55112E-17	0.012333822
310	67.29047022	1.069144824	0.447441925	5.55112E-17	0.004082211
311	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
312	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
313	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
314	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
315	67.69461257	1.078984996	0.442642522	5.55112E-17	0.012333822
316	67.69461257	1.078984996	0.442642522	5.55112E-17	0.012333822
317	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
318	67.29047022	1.069144824	0.447441925	5.55112E-17	0.004082211
319	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
320	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211

321	67.29047022	1.069144824	0.447441925	5.55112E-17	0.004082211
322	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
323	67.29047022	1.069144824	0.447441925	5.55112E-17	0.004082211
324	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
325	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
326	69.45353882	1.123265873	0.421010401	0	0.04949817
327	69.86121773	1.133885237	0.415813573	-5.55112E-17	0.058419197
328	69.92922914	1.135670483	0.41493956	0	0.059919265
329	66.88698585	1.059438764	0.452173376	0	-0.004054597
330	66.88698585	1.059438764	0.452173376	5.55112E-17	-0.004054597
331	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
332	67.29047022	1.069144824	0.447441925	5.55112E-17	0.004082211
333	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
334	67.29047022	1.069144824	0.447441925	5.55112E-17	0.004082211
335	67.69461257	1.078984996	0.442642522	5.55112E-17	0.012333822
336	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
337	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
338	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
339	67.29047022	1.069144824	0.447441925	5.55112E-17	0.004082211

340	67.29047022	1.069144824	0.447441925	0	0.004082211
341	67.69461257	1.078984996	0.442642522	5.55112E-17	0.012333822
342	66.88698585	1.059438764	0.452173376	5.55112E-17	-0.004054597
343	66.88698585	1.059438764	0.452173376	0	-0.004054597
344	66.88698585	1.059438764	0.452173376	5.55112E-17	-0.004054597
345	66.81980231	1.05783388	0.452955479	0	-0.005399791