

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA**  
**INSTITUTO DE INGENIERÍA**  
**MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA**



***“Desarrollo de una metodología para la selección de parámetros de los sistemas de barrido óptico y visión estereoscópica que mejoren el rendimiento.”***

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRO EN CIENCIAS**

**PRESENTA**

***Wendy Citlaly García González***

**DIRECTOR**

***Dr. Oleg Sergiyenko***

**CO-DIRECTORA**

***Dra. Wendy Flores Fuentes***

***Mexicali, B. C.***

***22 de Mayo 2022***

# Índice

<b>Capítulo 1. Introducción.....</b>	<b>15</b>
1.1. Planteamiento del problema.....	18
1.2. Antecedentes .....	18
1.3. Justificación .....	19
1.4. Objetivos de investigación.....	20
1.4.1. Objetivo General.....	20
1.4.2. Objetivos Específicos .....	20
1.5. Hipótesis .....	21
<b>Capítulo 2. Estado del Arte .....</b>	<b>21</b>
2.1. Metodología de Superficie de Respuesta .....	22
2.1.1. Diseños centrales compuestos.....	24
2.1.2. Diseños de Box-Behnken.....	24
2.2. Análisis Relacional Gray.....	25
2.3. ANOVA Unidireccional.....	27
2.4. Método Taguchi .....	31
2.4.1. Función Taguchi de perdida.....	34
2.5. Sistemas de visión.....	36
2.5.1. Clasificación de los sistemas de visión .....	38
2.5.2. Revisión documental de patentes.....	38
2.5.3. Clasificación de las tecnologías para la medición de la profundidad. ....	43
2.5.4. Sistema de visión estéreo .....	43
<b>Capítulo 3. Marco Teórico .....</b>	<b>49</b>
3.1. Generalidades sobre el diseño de experimentos .....	49
3.1.1. Diseño factorial.....	52
3.1.2. Identificación de las fuentes de incertidumbre .....	53

3.2. Métodos de defusificación .....	56
3.2.1. Centro de Gravedad (CoG).....	57
3.2.2. Bisector de Área (BoA).....	57
3.2.3. Máximo más pequeño y máximo más grande (SoM y LoM).....	58
3.2.4. Método de la media máxima MoM.....	58
3.2.5. Método del máximo .....	58
3.3. Métodos de filtrados digitales a imágenes.....	59
3.3.1. Filtros Gaussiano, Bilateral y de la Mediana .....	60
<b>Capítulo 4. Metodología de la Experimentación y Resultados ..</b>	<b>62</b>
4.1. Resultados con el Sistema de visión 1 .....	62
4.2. Resultados de los experimentos con el sistema óptico OSS.....	66
4.2.1. Aplicando ANOVA de una vía al sistema OSS .....	69
4.3. Resultados de los experimentos aplicando filtros digitales con el sistema óptico OSS.....	73
4.4. Resultados de los experimentos con sistemas de visión estereoscópica.....	74
4.4.1. Sistema de visión 2 .....	75
<b>Capítulo 5. Conclusiones.....</b>	<b>79</b>
<b>Referencias.....</b>	<b>81</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>84</b>

# Dedicatoria

*Dedico este trabajo a mi esposo e hija que fueron  
mi motivación para lograr este trabajo.*

# Agradecimientos

*Agradezco de antemano a mi director de tesis el Dr. Oleg Sergiyenko y a mi Co-directora de tesis la Dra. Wendy Flores Fuentes por haberme guiado en el desarrollo de la presente investigación.*

*También es importante mencionar a los integrantes del comité como a los Doctores Julio César Rodríguez Quiñonez, Daniel Hernández Balbuena y Fabián Natanael Murrieta Rico quienes a través de sus observaciones me permiten mejorar mucho mis competencias en este campo del conocimiento.*

*Finalmente agradezco haber sido parte de la Universidad Autónoma de Baja California, una de las mejores instituciones de este estado.*

# Lista de Acrónimos

En el siguiente listado se aprecian los acrónimos que se encuentran en todo el presente documento.

SHM	Structural Health Monitoring
ANOVA	Análisis de Varianza
AGV	Automatic Guided Vehicle
GPS	Global Positioning System
ToF	Time of Flight
LiDAR	Light Detection and Ranging
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
TVS	Technical Visión System
LDR	Light Dependent of Light
LED	Light Emiting Dlode
MSR	Metodología de Superficie de Respuesta
GRA	Análisis Relacional Gris
CRG	Coeficiente Relacional Gris
OSS	Optical Scanning System
POS	Pasive Optical Scanning

SSB	Sum of Squares Between
SSW	Sum of Squares Within
MSB	Mean Squares Between
MSW	Mean Squares Within
CTQ	Crítica para la calidad (Critical to Quality)
ML	Machine Learning
DOE	Diseño de Experimentos
CoA	Center of Gravity
BoA	Bisector of Area
Som	Smallest of Maximum
LoM	Largest of Maximum
MoM	Mean of Maximum

# Índice de Figuras

<i>Ilustración 1. Categorías para el diseño de experimentos</i>	22
<i>Ilustración 2. Tabla de valores críticos de la distribución F (0.05)</i>	29
<i>Ilustración 3. Diagrama de flujo del método Taguchi.</i>	32
<i>Ilustración 4. Función pérdida de calidad (Taguchi). Imagen recuperada de (Kumar, 2019).</i>	36
<i>Ilustración 5. Representación gráfica del método triangulación dinámica mediante un TVS.</i>	37
<i>Ilustración 6. Elementos de un sistema óptico de barrido.</i>	39
<i>Ilustración 7. Origen de las patentes por país de la revisión de patentes realizado en este trabajo.</i>	42
<i>Ilustración 8. Análisis grafico considerando las palabras clave.</i>	42
<i>Ilustración 9. Plano epipolar</i>	44
<i>Ilustración 10. Clasificación del emparejamiento estéreo.</i>	45
<i>Ilustración 11. Geometría de cámaras paralelas.</i>	46
<i>Ilustración 12. Diagrama de flujo de para el proceso de calibración de una cámara.</i>	48
<i>Ilustración 13. Cámara Acteck usada</i>	49
<i>Ilustración 14. Modelo general de un proceso.</i>	50
<i>Ilustración 15. Tipos de diseño de experimentos.</i>	52
<i>Ilustración 16. Aplicación de ventanas en el proceso de filtrado digital.</i>	60
<i>Ilustración 17. Sistema de visión estéreo 2.</i>	63
<i>Ilustración 18. Sistema de visión estéreo 1 usado para los experimentos.</i>	64
<i>Ilustración 19. Acercamiento sobre el objeto de referencia.</i>	65
<i>Ilustración 20. Localización geométrica del máximo local mediante los métodos Cog, LoM, MoM SoM y BoA.</i>	68

<i>Ilustración 21. Fuente de referencia colocado en mesa experimental.</i>	70
<i>Ilustración 22. Valores críticos obtenidos para el análisis ANOVA de un factor.</i>	72
<i>Ilustración 23. Características técnicas de las cámaras utilizadas para el cálculo de la profundidad.</i>	75
<i>Ilustración 24. Sistema de visión estero con cámaras WDM</i>	76
<i>Ilustración 25. Rendimiento del sistema estéreo 2 en términos de desviación estándar para medir la profundidad.</i>	77

# Índice de Tablas

<i>Tabla 1. Resumen de los elementos que componen al análisis estadístico mediante ANOVA. ....</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 2. Desarrollo de tecnología basado en sistemas ópticos. ....</i>	<i>41</i>
<i>Tabla 3. Diseños factoriales para 2, 3 y 4 variables experimentales. ....</i>	<i>53</i>
<i>Tabla 4. Arreglo ortogonal de los experimentos con el sistema de visión estéreo. ....</i>	<i>65</i>
<i>Tabla 5. Análisis estadístico del rendimiento del sistema óptico de barrido sin la aplicación de filtros digitales ..... </i>	<i>66</i>
<i>Tabla 6. Análisis estadístico del rendimiento del sistema óptico de barrido aplicando el método de umbral. ....</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 7. Análisis estadístico del rendimiento del sistema óptico de barrido aplicando el método de MoM. ....</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 8. Posición angular de los métodos Umbral, MoM y LoM (medidas en grados). ....</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 9. Tabla resumen del análisis estadístico realizado mediante ANOVA al cálculo de la posición angular mediante los métodos Umbral, MoM y LoM. ....</i>	<i>71</i>
<i>Tabla 10. Tiempo computacional en segundos aplicando los métodos Umbral, MoM y LoM (medidas en segundos). ....</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 11. Tabla resumen del análisis estadístico realizado mediante ANOVA para los tiempos de cómputo entre los métodos Umbral, MoM y LoM. ....</i>	<i>73</i>
<i>Tabla 12. Arreglo ortogonal para análisis relacional gray aplicado para diferentes tipos de filtros y configuraciones que mejoran el rendimiento del sistema de barrido. ....</i>	<i>74</i>
<i>Tabla 13. Arreglo ortogonal para análisis relacional gray aplicado para diferentes tipos de filtrado digital utilizando un sistema de visión estéreo. ....</i>	<i>78</i>

# Índice de Ecuaciones

Ec.(1)	23
Ec.(2)	23
Ec.(3)	23
Ec.(4)	25
Ec.(5)	25
Ec.(6)	26
Ec.(7)	26
Ec.(8)	27
Ec.(9)	27
Ec.(10)	27
Ec.(11)	30
Ec.(12)	30
Ec.(13)	30
Ec.(14)	30
Ec.(15)	31
Ec.(16)	31
Ec.(17)	31
Ec.(18)	35
Ec.(19)	35
Ec.(20)	37
Ec.(21)	43
Ec.(22)	46
Ec.(23)	46
Ec.(24)	46
Ec.(25)	46
Ec.(26)	46
Ec.(27)	46
Ec.(28)	46
Ec.(29)	47
Ec.(30)	54
Ec.(31)	55
Ec.(32)	55
Ec.(33)	57
Ec.(34)	58
Ec.(35)	58

<i>Ec.(36)</i>	58
<i>Ec.(37)</i>	61
<i>Ec.(38)</i>	61
<i>Ec.(39)</i>	61

## Resumen

*Los sistemas de visión desempeñan un rol muy interesante para mejorar el confort y calidad de vida de las personas. Por ejemplo, estos son implementados en la industria automotriz para la detección de objetos o personas que se acercan al automóvil. En algunos hogares inteligentes se pueden encontrar en los sistemas de vigilancia en donde se implementan cámaras de visión nocturna. Es importante mencionar que este sistema de visión se basa principalmente en la detección de objetos mediante cámaras o dispositivos ópticos.*

*El principal objeto de estudio del presente trabajo consiste en analizar un sistema técnico de visión desarrollado por el Instituto de Ingeniería de la UABC y buscar que configuraciones conducen a mejorar su rendimiento. Así mismo en esta investigación se realiza un análisis sobre un sistema de visión estéreo para poder integrar ambos sistemas en un solo instrumento.*

*Las metodologías adoptadas para la realización del presente trabajo consisten principalmente en la implementación de la metodología análisis relacional gris y ANOVA unidireccional para el diseño de experimentos. Este trabajo se centra en mejorar el rendimiento del TVS para determinar la posición angular de un objeto. En cuanto al sistema de visión estéreo se estudian los filtros digitales que son ampliamente usados en la literatura para el procesamiento de imágenes.*

*Los hallazgos obtenidos en este trabajo muestran una mejoría satisfactoria en el rendimiento del TVS para determinar la posición angular mediante la implementación de filtros digitales. En algunos casos se mejoró el costo computacional para determinar el máximo local que es fundamental para determinar la posición angular y también se hacen recomendaciones que surgieron en el desarrollo del presente trabajo de investigación.*

## Abstract

*Vision systems play a very interesting role in improving people's comfort and quality of life. For example, these are implemented in the automotive industry to detect objects or people approaching the car. In some smart homes they can be found in surveillance systems where night vision cameras are implemented. It is important to mention that vision systems are mainly based on the detection of objects using cameras or optical devices.*

*The main object of study of this work is to analyze a technical vision system developed by the UABC Engineering Institute of UABC and find out what configurations lead to improve its performance. Likewise, in this research, an analysis is carried out on a stereo vision system in order to integrate both systems into a single instrument.*

*The methodologies adopted to carry out this work consist mainly of the implementation of the gray relational analysis methodology and ANOVA one-way for the design of experiments. This work focuses on improving the performance of TVS to determine the angular position of an object. Regarding the stereo vision system, digital filters that are widely used in the literature for image processing are studied.*

*The findings obtained in this work show a satisfactory improvement in the performance of TVS to determine the angular position through the implementation of digital filters. In some cases, the computational cost was improved to determine the local maximum, which is essential to determine the angular position, and recommendations that emerged in the development of this research work are also made.*

## Capítulo 1. Introducción

Actualmente los sistemas de visión desempeñan un rol muy importante en la sociedad. Estos se encuentran en todos lugares, por ejemplo, en el sector salud estos sistemas en conjunto con la inteligencia artificial hacen posible analizar las radiografías mediante algoritmos computacionales que determinan si existen anomalías. En un caso específico, se puede mencionar el análisis de las radiografías del pulmón o del cáncer de mama. Otro de los sectores que también se puede mencionar es el sector automotriz en donde también los sistemas de visión cobran relevancia, sobre todo para resolver problemas como los relacionados con la calidad, por ejemplo, cuando hay componentes faltantes, superficies sucias, dañadas o piezas diferentes.

Los sistemas de visión procuran emular la visión humana y un ejemplo de sus avances consisten en que en la industria ya es posible realizar inspecciones mediante sistemas inteligentes de visión. Esto conlleva a reducir el error humano por fatiga o estrés al realizar estas tareas de inspección. Las aplicaciones de los sistemas de visión sirven de soporte para dar mantenimiento a las estructuras como puentes, edificios, túneles, plataformas petroleras etc. El campo que estudia esto, es conocido como monitoreo de salud estructural (SHM, *structural health monitoring*). Aquí es importante mencionar que la medición de los desplazamientos tanto vertical u horizontal son de interés para poder prever algún daño en las estructuras.

En la navegación autónoma los sistemas de visión también desempeñan un rol muy importante. Por ejemplo, ya se han desarrollado sistemas de guiado o navegación capaces de conducir de forma autónoma vehículos, a esto se le conoce como vehículo de guiado automático AGV (por sus siglas en inglés, *automatic guided vehicle*). Unos AGV's necesitan seguir una trayectoria y saber su posicionamiento en todo momento para llevar a cabo tareas específicas. Para conocer de su posicionamiento y de su orientación existen muchos dispositivos y tecnologías distintas a las de sistemas de visión. Esa tecnología está basada en dispositivos de posicionamiento global GPS (por sus siglas en inglés, *global positioning system*) o acelerómetros. Sin embargo, en circunstancias de operación en interiores estos dispositivos no ofrecen una respuesta satisfactoria a las necesidades y requerimientos. Por otro lado, los dispositivos basados en visión óptica como las cámaras o fotosensores, representan una alternativa ampliamente utilizada para la navegación autónoma. Esto se debe principalmente a la irrupción de la inteligencia artificial. Algunos ejemplos de aplicaciones de los sistemas de visión son el caso del guiado óptico en el suelo que mediante el uso de cámaras es posible capturar en tiempo real el entorno de trabajo, así como calcular distancias, coordenadas. También las tareas de reconocimiento de objetos y la detección de obstáculos son muy relevantes en varios campos de investigación.

En otros contextos, la medición de coordenadas o distancias de objetos en cualquier ámbito es muy valorado. Como bien se mencionó anteriormente que

con estos parámetros los autómatas o robots móviles se pueden orientar o realizar tareas de localización. Actualmente las cámaras RGB-D realizan esa función, es decir estas son capaces de medir la profundidad de una escena. El dispositivo LiDAR (acrónimo del inglés LiDAR, Light Detection and Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging) también es ampliamente utilizado para realizar la misma tarea, sin embargo, este segundo emplea dispositivos activos como el láser el cual es emitido en forma de pulsos sobre una superficie de interés. Este a su vez utiliza el método de tiempo de vuelo ToF (time of flight) para determinar la distancia recorrida por el láser.

Por otro lado, se puede mencionar que el Instituto de Ingeniería de la UABC cuenta con una patente sobre un sistema técnico de visión (TVS, acrónimo del inglés, *technical vision system*) el cual es capaz de realizar tareas para determinar la profundidad de una escena o la medición de coordenadas. Este dispositivo está integrado principalmente por una apertura y un láser los cuales son accionados por servomecanismos capaces de conocer la posición angular de estos dos elementos en todo momento. La profundidad es calculada mediante el método de triangulación dinámica a partir de la posición angular detectada por la apertura y el láser.

Uno de los propósitos de esta investigación consiste en diseñar experimentos que permitan integrar un TVS con cámaras RGB-D (sistemas de visión estéreo). En el presente estudio es de interés mejorar el rendimiento de estos sistemas para realizar las mediciones de coordenadas, así como también la posición angular de las aperturas. Por aperturas se definirá como elementos mecánicos que están constituidos por un sistema óptico el cual capta la luz a partir de fuentes de radiación ya sea en forma de luz coherente o incoherente. En esencia un TVS es un instrumento de medición que como variable de salida nos ofrece un valor cuantificable como una coordenada o posición angular. Entonces este dispositivo al igual como otros dispositivos de visión está sujeto a factores que aumentan su rendimiento. Estos instrumentos pueden ser utilizados a nivel industrial o de laboratorio y por ende estos deben de regirse bajo especificaciones de calidad establecidas en normas técnicas. La idea principal de esta tesis es descubrir numéricamente si se pueden realizar mejoras en el

rendimiento entre diferentes sistemas de visión estéreo (usando 2 cámaras) y el sistema TVS.

El desarrollo de la presente tesis estará integrado por varios capítulos. En la sección 2 se profundizará el estado del arte en el cual se detallarán las técnicas usadas para el diseño de experimentos. En la sección 2 se abordará el marco teórico el cual sirve de base para mostrar información relevante sobre algunos elementos que son importantes para comprender en gran medida conceptos relacionados con este trabajo. El capítulo 4 resume la metodología de experimentación y los resultados de la presente tesis. En esta sección se explican a detalle los experimentos realizados para identificar cuáles son las mejoras tanto para el sistema TVS como los sistemas de visión estero. Finalmente, en la sección 5 se muestran las conclusiones, así como las recomendaciones del presente trabajo de tesis.

## **1.1. Planteamiento del problema**

Actualmente los sistemas ópticos de barridos y de estereovisión requieren de un estudio para determinar su rendimiento. Dado que existen muchos factores y configuraciones de estos sistemas de visión, no se ha realizado un análisis mediante metodologías de diseño de experimentos que contribuyan a la selección óptima de los elementos (motor, sensores, materiales) o configuraciones (Velocidad de escaneo, método de barrido), a fin de realizar mediciones de una determinada resolución (dependiendo la aplicación) en el menor tiempo posible.

## **1.2. Antecedentes**

En el laboratorio de opto electrónica y mediciones automáticas del Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California, se ha desarrollado un sistema de barrido para realizar tareas de SHM, cuyo principio fundamental de operación se basa en instrumentos ópticos como: un espejo cilíndrico con una sola superficie de reflexión a 45°, dos lentes biconvexas, y una apertura. Estos instrumentos reflejan la luz proveniente de una fuente de referencia hacia las

lentes biconvexas para colimar y enfocar la radiación hacia un fotosensor. En experimentaciones preliminares y utilizando este método, se han encontrado resultados satisfactorios solo en un ambiente controlado como es en laboratorio. Sin embargo, estos resultados contrastan a los obtenidos en experimentaciones recientes, que fueron realizadas bajo condiciones no controladas y con exposición a la luz solar. Los resultados bajo condiciones reales dieron como resultado que el sistema OSS detectó diferentes perturbaciones que afectaron el rendimiento y resolución del sistema OSS, haciendo incluso imposible tomar mediciones en ciertas horas del día en que se presentaba mayor intensidad de luz solar. Mientras que para aplicaciones de SHM el tiempo de barrido de un OSS se estima suficiente (para degradaciones sutiles y no abruptas), para tareas de navegación se requiere de una mayor velocidad de barrido con la adecuada y óptima calidad de medición.

Estos antecedentes sugieren que existen oportunidades para mejorar como es el caso el uso de otros dispositivos fotosensores para capturar la señal óptica, y mediante el diseño de experimentos es posible buscar alternativas en la selección de sus parámetros que pueden resolver el problema de poder operar en exteriores ante ruido ambiental, así como para poder navegar a una velocidad adecuada que permita detectar y evadir obstáculos.

### **1.3. Justificación**

La mejora de la resolución de un sistema de barrido es un requerimiento indispensable para poder realizar lecturas correspondientes y determinar la posición angular de una fuente de referencia. Por esto, la búsqueda de elementos y herramientas que mejoren el rendimiento del sistema óptico y de visión es común, de acuerdo a anteriores investigaciones realizadas sobre estos sistemas. Por lo anterior es imprescindible el uso de diseño de experimentos con el fin de hacer mejoras relacionadas con la resolución, la reducción de costos en materiales y otros estudios de repetibilidad y calibración. Como se propone en la presente tesis, el desarrollo de una metodología para la selección de parámetros

de los sistemas de barrido óptico y visión estereoscópica que mejoren el rendimiento de calidad de medición en menores tiempos. Por otra parte, la selección sistemática de los elementos que componen a un sistema óptico de barrido permite la disminución de costos para su implementación además de la sustitución de materiales, la modificación de métodos de fabricación o incluso el diseño de nuevos productos.

## **1.4. Objetivos de investigación**

### **1.4.1. Objetivo General**

El propósito de esta investigación es estudiar a profundidad el diseño de experimentos para la optimización de la selección de elementos, parámetros y distintas configuraciones de un sistema OSS y un sistema de estereovisión.

### **1.4.2. Objetivos Específicos**

- Identificar los métodos existentes para optimizar el uso de los recursos y mejorar el rendimiento del sistema óptico y de estereovisión.
- Comparar resultados utilizando distintos tipos de técnicas estadísticas y herramientas.
- Desarrollar y evaluar el método propuesto.
- Implementación del método en el sistema de barrido óptico y estereovisión.
- Analizar resultados para validar el método propuesto.

## 1.5. Hipótesis

Para tareas de monitoreo estructural y de navegación autónoma los sistemas de barrido óptico y de visión estéreo ofrecen una alternativa para resolver tareas de detección de objetos o daños en estructuras. Sin embargo, se requiere aumentar las capacidades de medición de estos sistemas en ambientes de distintos tipos de iluminación, así como obtener mediciones de alta resolución en el menor tiempo posible simultáneamente.

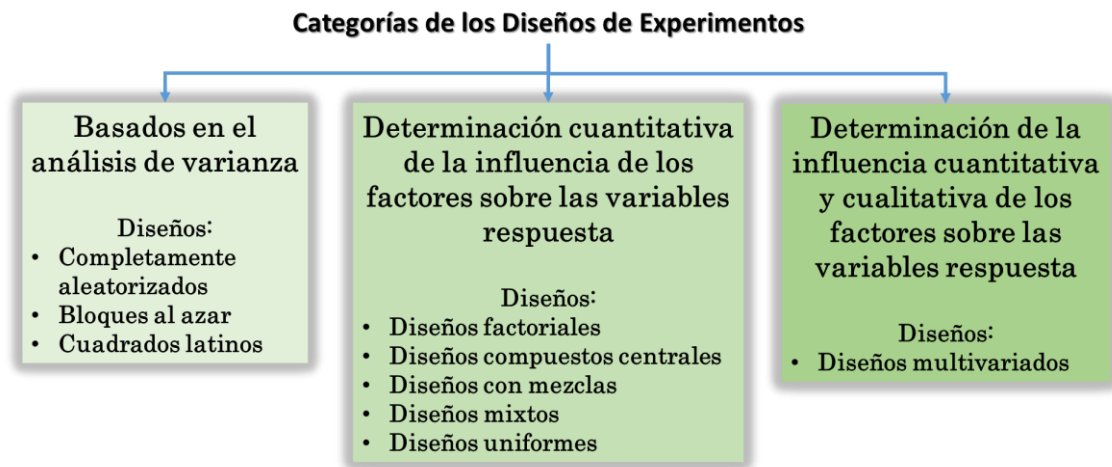
En este contexto, la hipótesis de la presente investigación se centra principalmente en la premisa de que es posible optimizar y determinar las configuraciones de un sistema óptico de barrido y de estereovisión que tengan un mejor rendimiento y precisión mediante la implementación de análisis relacional Grey basado en método Taguchi.

## Capítulo 2. Estado del Arte

De acuerdo a (Salazar & Zapata, 2009), los estudios de robustez, son aplicados para observar el comportamiento de un estimador ante diferentes situaciones hipotéticas que pudieran presentarse en la realidad.

En el siguiente mapa conceptual de la Ilustración 1, se muestran las categorías para realizar el diseño de experimentos. Estas categorías son ampliamente utilizadas en el campo de la tecnología, las cuales corresponden al grupo basado en análisis de varianza, luego sigue el grupo para determinar cuantitativamente la influencia de los factores sobre las variables de respuesta, finalmente el tercer

grupo está enfocado en la determinación de la influencia cuantitativa y cualitativa de los factores sobre las variables de respuesta.



**Ilustración 1. Categorías para el diseño de experimentos**

Estas categorías conducen a ubicar las características propias de los equipos usados en un diseño de experimentos. Para el caso de esta investigación los bloques 2 y 3 son los que se adecuan a los parámetros de entrada y salidas que manejan los sistemas de barrido y de estereovisión. Es decir, los factores o parámetros de entrada pueden ser los filtros digitales seleccionados para el tratamiento de las señales. Por otra parte, en cuanto a las variables de respuesta estudiadas, estas corresponderían a la profundidad o la posición angular calculada. A continuación, en las siguientes secciones se presentan metodologías como Metodología de Superficie de Respuesta (MSR), análisis relacional gris y ANOVA unidireccional.

## 2.1. Metodología de Superficie de Respuesta

La herramienta MSR, corresponde a un conjunto de técnicas que fueron propuestas por Box y Wilson (Box, 1951). Una de las ventajas de esta técnica consiste en reducir el número de ensayos experimentales para poder comparar o evaluar múltiples variables e iteraciones entre ellas. De acuerdo a (Amanda Acosta Solares, 2021) en donde se han realizado una búsqueda sobre la

información referente a esta técnica se ha hecho notar que existen relativamente pocas publicaciones actuales relacionadas con la MSR.

La representación matemática de MSR para un modelo lineal de primer orden puede ser expresado de la siguiente forma:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \varepsilon \quad \text{Ec.(1)}$$

Donde:

$y$  = Variable de respuesta.

$x_i$  = Variable independiente.

$\beta_0$  = Coeficiente de intersección.

$\varepsilon$  = Error experimental aleatorio.

Este tipo de modelo es útil cuando no se tiene suficiente información acerca de la forma que presenta la superficie de respuesta, así que una forma de aproximar o empezar a experimentar se hace con los modelos de primer orden (Alejandro Ruiz González, 2017).

Ahora bien, este modelo lineal de primer orden con interacciones puede ser calculado mediante:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{j=2}^k \sum_{i=1}^{j-1} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad \text{Ec.(2)}$$

y el modelo cuadrático o de segundo orden:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{j=2}^k \sum_{i=1}^{j-1} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \varepsilon \quad \text{Ec.(3)}$$

Donde:

$x_j$  = Variable independiente.

$\beta_i$  = Coeficiente lineal.

$\beta_{ii}$  = Coeficiente cuadrático.

$\beta_{ij}$  = Coeficiente de los productos cruzados.

Dentro de este tipo de técnicas existen dos tipos principales de diseños de superficie de respuesta los cuales se pueden mencionar a continuación:

### 2.1.1. Diseños centrales compuestos

Este es uno de los experimentos ampliamente utilizado en diseños de superficie de respuesta de acuerdo a (Minitab, 2022). Las características más relevantes de este tipo de diseños son mencionadas a continuación.

- Pueden tener de varios niveles por factor hasta 5.
- Pueden ajustarse a un modelo cuadrático completo.

### 2.1.2. Diseños de Box-Behnken

Este tipo de diseño tiene menos puntos de diseño que los diseños centrales compuestos. Esto resulta muy importante al momento del diseño de experimentos ya que al implementarlos estos tienen un menor costo computacional en comparación con los diseños centrales compuestos. Dos características importantes de estos diseños son las siguientes:

- Estos pueden estimar eficientemente los coeficientes de primer y segundo orden; sin embargo, no pueden incluir corridas de un experimento factorial.

- Siempre tienen 3 niveles por factor.

## 2.2. Análisis Relacional Gray

En teoría Gris, el negro representa la carencia de información mientras que el blanco significa lo opuesto, es decir que la información que se tiene es completa.

Por lo tanto, la información que está incompleta o indeterminada corresponde al gris. El análisis relacional gris (GRA) es un método cuantitativo de análisis del grado de relación gris entre cada factor en un sistema gris (Sifeng Liu, 2010).

Una de las ventajas del método GRA es que este puede ser implementado para problemas que tengan incompleta la información y que no sean muy claros.

**Paso 1:** para cada experimento en el arreglo ortogonal, el valor de la respuesta  $y_{ij}$ , para cada  $i$  va a ser obtenido.

**Paso 2:** Normalización de los datos: para obtener el normalizado  $x_{ij}$  con rango entre 0 y 1 de la respuesta  $y_{ij}$  se debe de considerar la siguiente Ecuación (4). Esta ecuación considera “entre más grandes los valores mejor”

$$x_{ij} = \frac{y_{ij} - \min y_{ij}}{\max y_{ij} - \min y_{ij}} \quad \text{Ec.(4)}$$

Sin embargo, cuando la expectativa de que los resultados sean que “entre más pequeños los valores mejor” la siguiente Ecuación (5) da mejores resultados

$$x_{ij} = \frac{\max y_{ij} - y_{ij}}{\max y_{ij} - \min y_{ij}} \quad \text{Ec.(5)}$$

**Paso 3:** Se calcula el coeficiente relacional gris (GRC por sus siglas en inglés) para el  $j$ -énésima salida o respuesta del experimento, entonces  $\xi_{ij}$  es calculado mediante la Ecuación (6).

$$\xi_{ij} = \frac{\Delta_{min} + \psi\Delta_{max}}{\Delta_{0ij} + \psi\Delta_{max}} \quad \text{Ec.(6)}$$

Donde  $\Delta_{0ij} = |x_{0j} - x_{ij}|$ , el cual corresponde a la diferencia absoluta entre el ajuste ideal  $x_{0j}$  (generalmente es igual a 1) y  $x_{ij}$ ;  $\psi$  es el coeficiente o factor diferenciador entre cero y uno; usualmente este es igual a 0.5.  $\Delta_{min}$  y  $\Delta_{max}$  son los valores mas pequeños y más grandes de  $\Delta_{0ij}$  respectivamente.

**Paso 4:** En caso que el grado relacional gris (GRG) es por  $g_i$  para  $i$ -enésimo experimento para 3 salidas o respuestas entonces  $g_i$  es calculado mediante (7).

$$g_i = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 \xi_{ij} \quad \text{Ec.(7)}$$

**Paso 5:** Los datos obtenidos en  $g_i$  son usados para obtener en nivel óptimo de los parámetros mediante el enfoque Taguchi. La razón S/N se refiere a la relación entre señal y ruido que es usada para medir la calidad de las características desviadas del valor. Independientemente de la categoría de las respuestas, una mayor relación S/N corresponde a características de mejor calidad. Por lo tanto, el nivel óptimo de los parámetros del proceso es el nivel con la mayor relación S/N basado en las características deseadas de la salida de los parámetros; la relación S/N ( $\eta$ ) de la respuesta de la respuesta 'y' son formulados de la siguiente manera:

Para pequeñas características: Si los valores más pequeños de las características son deseables, entonces esta relación se calcula mediante (8).

$$\eta = -10 \log \left( \left( \frac{1}{n} \right) \sum y^2 \right) \quad \text{Ec.(8)}$$

Un ejemplo de características pequeñas a estudiar en este trabajo consiste en minimizar el error cuadrático medio para calcular la posición angular. La minimización del tiempo o costo computación que duran los algoritmos en realizar su tarea.

En el caso que los resultados de las salidas requieran que entre más grandes sean mejor. La relación señal ruido puede ser calculad mediante (9).

$$\eta = -10 \log \left( \left( \frac{1}{n} \right) \sum 1/y^2 \right) \quad \text{Ec.(9)}$$

Un ejemplo aplicado de la expresión anterior consiste en maximizar o buscar aumentar la resolución de los sistemas de visión.

### 2.3. ANOVA Unidireccional

El principal objetivo de la herramienta ANOVA unidireccional es determinar si los datos de varios grupos (niveles) de un factor tienen una media en común. En otras palabras, mediante ANOVA unidireccional se puede conocer si los diferentes grupos de una variable independiente tienen diferentes efectos en la variable de respuesta  $y$ . Supongamos que en el Instituto de Ingeniería de la UABC se quiere determinar si los métodos basados en defusificación para calcular la posición angular pueden reducir el error cuadrático medio en comparación con el método basado en umbrales de voltaje. En este caso, la variable independiente es el método de barrido, y la variable de respuesta es el error cuadrático medio.

ANOVA unidireccional es un simple caso especial del modelo lineal. La forma ANOVA unidireccional del modelo es descrito por Ec.(10).

$$y_{ij} = \alpha_j + \varepsilon_{ij} \quad \text{Ec.(10)}$$

Bajo la siguiente suposición:

$y_{ij}$  es una observación, en la que  $i$  representa el número de observación, y  $j$  representa un grupo diferente (nivel) de la variable predictora donde  $ij$  y todo  $y_{ij}$  son independientes.

$\alpha_j$  representa la media de la población para el grupo (nivel o tratamiento)  $j$ .

$\varepsilon_{ij}$  es el error aleatorio, independiente y distribuido normalmente, con cero media y varianza constante, es decir  $\varepsilon_{ij} \sim N(0, \sigma^2)$ .

Mediante ANOVA se prueba a hipótesis de que todas las medias de grupo son iguales frente a la hipótesis alternativa de que al menos un grupo es diferente de los demás.

La Tabla 1, ANOVA muestra el resumen de todos los parámetros que son calculados para el análisis correspondiente.

Tabla 1. Resumen de los elementos que componen al análisis estadístico mediante ANOVA.

<b>Fuente</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Media de cuadrados (MS)</b>	<b>F</b>
Tratamientos	$df_b = k - 1$	$SSB$	$SSB / (k - 1)$	$MSB / MSW$
Error	$df_w = n - k$	$SSW$	$SSW / (n - k)$	-
Total	$df_{total} = n - 1$	$SS_{total}$	-	-

Donde

$k$  representa el número de grupos.

$n_i$  representa el número de las observaciones en cada  $i$ -ésimo grupo.

$n$  representa el número total de observaciones.

A continuación, se enumeran los pasos a seguir para aplicar el análisis ANOVA unidireccional.

### Paso número 1

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$$

$H_a$  : no todos los grupos de medias son iguales.

### Paso número 2

$F_{critico}$  se calcula a partir de los grados de libertad  $df_b$  y  $df_w$

Donde los grados de libertad del numerador que aparecen en la siguiente Ilustración 2 corresponden a  $df_b$  (eje x) y los grados de libertad del denominador corresponden a  $df_w$  (eje y).

g.d.l	Grados de libertad del Numerador								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	161,4	199,5	215,7	224,6	230,2	234,0	236,8	238,9	240,5
2	18,513	19,000	19,164	19,247	19,296	19,330	19,353	19,371	19,385
3	10,128	9,552	9,277	9,117	9,013	8,941	8,887	8,845	8,812
4	7,709	6,944	6,591	6,388	6,256	6,163	6,094	6,041	5,999
5	6,608	5,786	5,409	5,192	5,050	4,950	4,876	4,818	4,772
6	5,987	5,143	4,757	4,534	4,387	4,284	4,207	4,147	4,099
7	5,591	4,737	4,347	4,120	3,972	3,866	3,787	3,726	3,677
8	5,318	4,459	4,066	3,838	3,687	3,581	3,500	3,438	3,388
9	5,117	4,256	3,863	3,633	3,482	3,374	3,293	3,230	3,179
10	4,965	4,103	3,708	3,478	3,326	3,217	3,135	3,072	3,020
11	4,844	3,982	3,587	3,357	3,204	3,095	3,012	2,948	2,896
12	4,747	3,885	3,490	3,259	3,106	2,996	2,913	2,849	2,796
13	4,667	3,806	3,411	3,179	3,025	2,915	2,832	2,767	2,714
14	4,600	3,739	3,344	3,112	2,958	2,848	2,764	2,699	2,646
15	4,543	3,682	3,287	3,056	2,901	2,790	2,707	2,641	2,588
16	4,494	3,634	3,239	3,007	2,852	2,741	2,657	2,591	2,538
17	4,451	3,592	3,197	2,965	2,810	2,699	2,614	2,548	2,494
18	4,414	3,555	3,160	2,928	2,773	2,661	2,577	2,510	2,456
19	4,381	3,522	3,127	2,895	2,740	2,628	2,544	2,477	2,423
20	4,351	3,493	3,098	2,866	2,711	2,599	2,514	2,447	2,393
21	4,325	3,467	3,072	2,840	2,685	2,573	2,488	2,420	2,366
22	4,301	3,443	3,049	2,817	2,661	2,549	2,464	2,397	2,342
23	4,279	3,422	3,028	2,796	2,640	2,528	2,442	2,375	2,320
24	4,260	3,403	3,009	2,776	2,621	2,508	2,423	2,355	2,300
25	4,242	3,385	2,991	2,759	2,603	2,490	2,405	2,337	2,282

Ilustración 2. Tabla de valores críticos de la distribución F (0.05)

De esta misma ilustración se obtiene el valor crítico F mediante las coordenadas que forman los grados de libertad tanto del numerador como del denominador  $df_b$  y  $df_w$ , respectivamente.

### Paso número 3

Se calculan  $\bar{X}_j$  la media de cada grupo, así como la media total  $\bar{X}$ .

Una vez obtenidos estos parámetros se procede a calcular la suma de cuadrados total mediante Ec.(11)

$$SS_{total} = \sum_{ij} (x_{ij} - \bar{X})^2 \quad \text{Ec.(11)}$$

Donde:

$\bar{X}$  representa la media general de todos los datos.

$x_{ij}$  representa el  $i$ -enésimo dato de observación e  $j$ -enésimo grupo.

$\bar{X}_j$  representa media de cada grupo o columna de los datos.

Luego se procede a calcular la suma de cuadrados dentro de los grupos aplicando Ec. (12).

$$SSW = \sum_{\text{grupos}} (x_{ij} - \bar{X}_j)^2 \quad \text{Ec. (12)}$$

En la ecuación anterior  $\bar{X}_j$  representa la media del  $j$ -enésimo grupo

Una vez conociendo  $SS_{total}$  y  $SSW$  es posible calcular  $SSB$  a partir de Ec.(13)

$$SSB = SS_{total} - SSW \quad \text{Ec.(13)}$$

También puede ser calculado mediante Ec.(14)

$$SSB = \sum_{\text{grupos}} n_j (\bar{X}_j - \bar{X})^2 \quad \text{Ec.(14)}$$

El elemento  $n_j$  representa el número total de observaciones de cada grupo.

#### **Paso número 4**

En este paso se calcula  $MSB$ , mediante Ec.(15)

$$MSB = \frac{SSB}{df_b} \quad \text{Ec.(15)}$$

Así mismo también se determina  $MSW$ , mediante Ec.(16)

$$MSW = \frac{SSW}{df_w} \quad \text{Ec.(16)}$$

#### **Paso número 5**

Finalmente, se determina  $F$ , aplicando la siguiente ecuación Ec.(17)

$$F = \frac{MSB}{MSW} \quad \text{Ec.(17)}$$

y se comparan  $F_{critico}$  y  $F$ , ya sea para rechazar o aceptar la hipótesis nula  $H_0$ .

## **2.4. Método Taguchi**

El método Taguchi o también llamado método robusto, el cual fue diseñado para mejorar la calidad de productos y procesos donde el rendimiento depende de varios factores. De acuerdo a (Roy, 1990), este método puede implementarse bajo los siguientes tres objetivos:

- 1) para establecer la mejor condición óptima para un producto o un proceso.
- 2) para estimar la contribución de los factores individuales.

3) para estimar la respuesta bajo condiciones óptimas.

Las áreas de aplicación del método Taguchi, son las siguientes: Análisis, prueba y desarrollo, y proceso de desarrollo.

A continuación, se detallan estas áreas de aplicación.

**Análisis:** En el diseño de productos y procesos de ingeniería. En esta área es utilizado para obtener los mejores parámetros de las configuraciones óptimas de diseño.

**Prueba y desarrollo:** Dado que la realización del desarrollo y prueba tiene costo para llegar a realizar prototipos experimentales, la aplicación de Taguchi reduce significativamente el número de pruebas.

**Proceso de desarrollo:** En esta área es indispensable identificar las contribuciones individuales e identificación de sus relaciones intrínsecas para el desarrollo de un proceso.

En la Ilustración 3 se muestran los pasos a seguir para la implementación del método Taguchi.

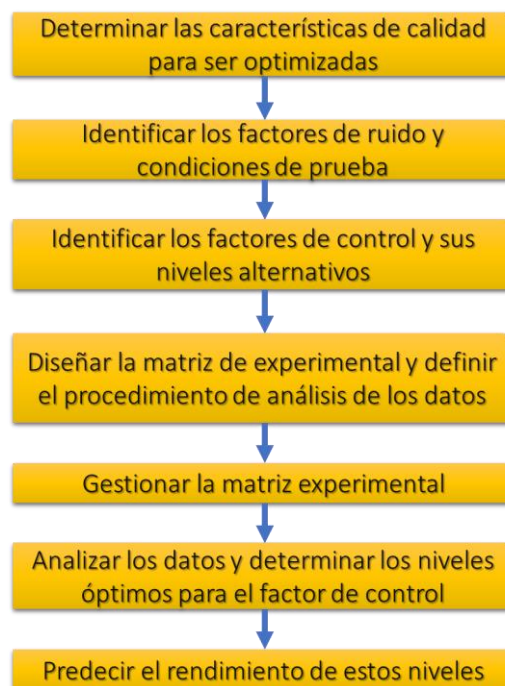


Ilustración 3. Diagrama de flujo del método Taguchi.

### **Determinar las características de calidad para ser optimizadas**

El primer paso del método Taguchi es determinar la característica de calidad para ser optimizada. La característica de calidad es un parámetro en donde su variación tiene un efecto crítico. Es la salida o la variable de respuesta bajo estudio.

### **Identificar los factores de ruido y condiciones de prueba**

El siguiente es para identificar los factores de ruido que pueden tener impacto negativo en el rendimiento y la calidad. Los factores de ruido son aquellos parámetros los cuales son tanto incontrolables como demasiados costosos para controlar. Los factores de ruido incluyen las variaciones bajo condiciones ambientales de operación, deterioro de componentes por el uso, y la variación en la respuesta entre los productos del mismo diseño que tienen los mismos elementos de entrada.

### **Identificar los parámetros de control y sus niveles alternativos.**

El tercer paso es identificar los parámetros de control que se cree que tienen efectos significativos en la característica de calidad. Los parámetros de control (prueba) son aquellos factores de diseño que se pueden establecer y mantener. Los niveles (valores de prueba) para cada parámetro de prueba deben elegirse en este punto. El número de niveles, con valores de prueba asociados, para cada parámetro de prueba define la región experimental.

### **Diseñar la matriz de experimental y definir el procedimiento de análisis de los datos**

El cuarto paso para la implementación es diseñar el experimento matricial y definir el procedimiento de análisis de datos. Primero, se seleccionan los arreglos ortogonales apropiados para los parámetros de ruido y control para un estudio específico. Taguchi proporciona muchas matrices ortogonales estándar y gráficos lineales correspondientes para este propósito. Después de seleccionar las matrices ortogonales apropiadas, debe definirse un procedimiento para simular la variación en la característica de calidad debido a los factores de ruido.

## **Gestionar la matriz experimental**

El siguiente paso es realizar el experimento matricial y registrar los resultados. El método Taguchi se puede usar en cualquier situación en la que haya un proceso controlable. El proceso controlable puede ser un experimento real de hardware, sistemas de ecuaciones matemáticas o modelos de computadora que pueden modelar adecuadamente la respuesta de muchos productos y procesos.

## **Analizar los datos y determinar los niveles óptimos para el factor de control**

Después de que se hayan llevado a cabo los experimentos, se debe determinar la configuración óptima del parámetro de prueba dentro del diseño del experimento. Para analizar los resultados, el método Taguchi utiliza una medida estadística de rendimiento llamada relación señal / ruido (S / N) tomada de la teoría del control eléctrico.

## **Predecir el rendimiento de estos niveles**

Usando el método de Taguchi para el diseño de parámetros, la configuración óptima predicha no necesariamente corresponde a una de las filas del experimento de matriz. Este suele ser el caso cuando se utilizan diseños altamente fraccionados. Por lo tanto, como paso final, se ejecuta una confirmación experimental utilizando los niveles óptimos predichos para los parámetros de control que se están estudiando.

### **2.4.1. Función Taguchi de pérdida**

De acuerdo a Taguchi, cada vez que los procesos se desvían del objetivo, aun cuando estos estén dentro de las especificaciones existen pérdidas tanto para el productor como para el consumidor.

Entre más grandes sean las desviaciones del objetivo, más grandes serán las pérdidas.

La pérdida es proporcional al cuadrado de la desviación del objetivo.

La función Taguchi de la pérdida queda expresada de la siguiente forma mediante la ecuación Ec.(18)

$$L(Y) = \frac{M}{D} (Y - t)^2 \quad \text{Ec.(18)}$$

Donde:

$M$  = Perdidas cuando el proceso no está dentro de las especificaciones.

$D$  = Tolerancia definida.

$t$  = Objetivo para el proceso / CTQ Critica para la calidad (Critical to Quality en inglés).

$Y$  = Media del proceso o valor.

La pérdida no solo es dada a las desviaciones del objetivo, si no también es dado a las variaciones de la señal/ y factores de control, la fórmula de calidad de la pérdida por unidad del producto es una muestra que se puede ser expresada como:

$$Q_a = \frac{M}{D} [(\mu - t)^2 + \sigma^2] \quad \text{Ec.(19)}$$

Dónde:

$Q_a$  = representa el promedio de pérdida de calidad por unidad del producto en una muestra que sigue una distribución con media  $\mu$  y desviación estándar  $\sigma$ ,  $t$  -objetivo.

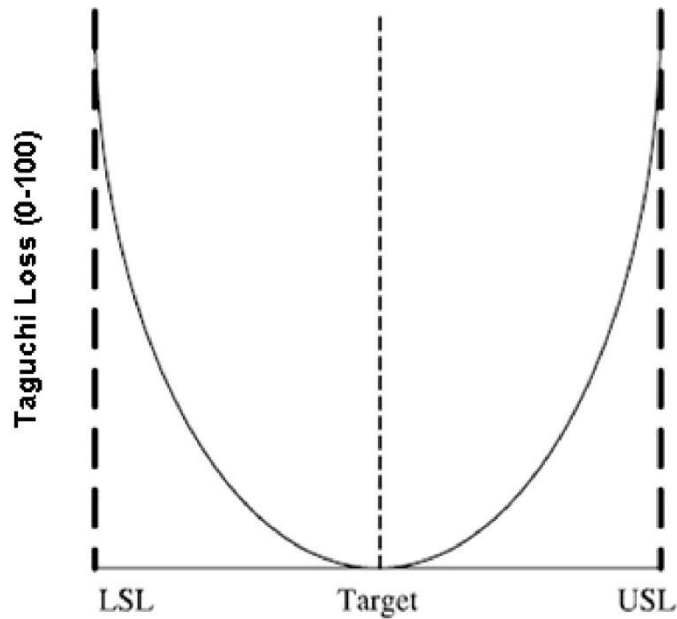


Ilustración 4. Función pérdida de calidad (Taguchi). Imagen recuperada de (Kumar, 2019).

Donde

LSL representa el límite menor de especificación y USL el límite superior de especificación y Target es el objetivo.

## 2.5. Sistemas de visión

En esta sección se abordan los hallazgos más relevantes de los últimos años sobre sistemas de visión, en donde se indican los elementos característicos. La metodología llevada a cabo abarca desde búsqueda tecnológica, así como la revisión de patentes de los últimos 10 años en cuanto a los sistemas ópticos de barrido. Así mismo se hace una revisión documental sobre patentes para tener una mejor perspectiva sobre las tendencias en el área y el campo de interés. El estado de arte que aquí se presenta cubre las áreas de los sistemas de visión por computador MV (de sus siglas en inglés *machine visión*) sistemas OSS y sistemas de visión estereoscópica, así como los sistemas de navegación autónoma.

## Principio operación sobre triangulación dinámica

La técnica de triangulación dinámica es una herramienta muy útil para realizar mediciones geométricas. En esta presente tesis se utiliza para medir la profundidad de una escena o la distancia que se tiene entre el sistema TVS y un objeto de referencia. La siguiente Ilustración 5 detalla un esquema sobre el método de triangulación dinámica utilizando un TVS.

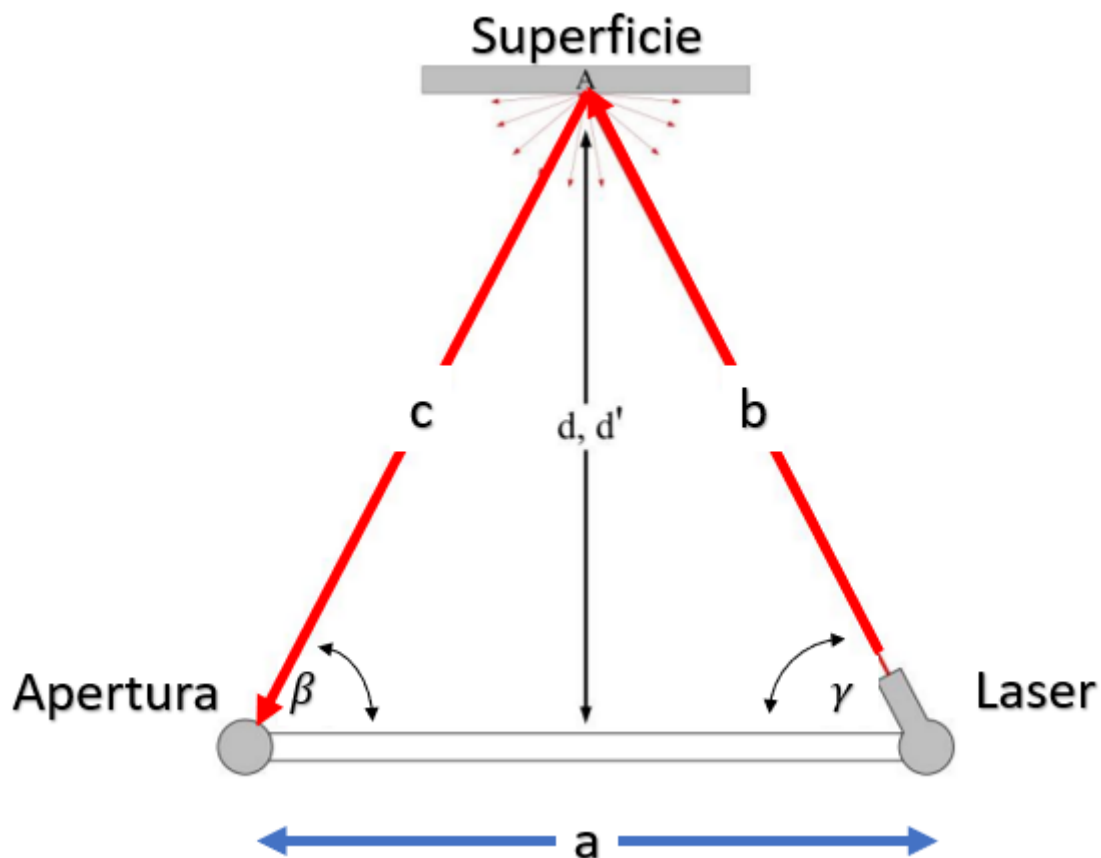


Ilustración 5. Representación gráfica del método triangulación dinámica mediante un TVS.

Dado a que la distancia  $a$  y los ángulos  $\beta$  y  $\gamma$  con conocidos se puede aplicar la ley de senos para obtener la distancia  $d$ :

$$d = a \frac{\text{sen}(\beta)\text{sen}(\gamma)}{\text{sen}(\beta+\gamma)} \quad \text{Ec. (20)}$$

A partir de estos elementos se puede extender y aplicar un conjunto de ecuaciones e identidades trigonométricas para calcular la distancia  $b$  y  $c$ .

### 2.5.1. Clasificación de los sistemas de visión

Es importante distinguir que existen varios métodos para realizar las mediciones optoelectrónicas basadas en sistemas de visión. Entre las principales técnicas existen el método pasivo y el método activo.

En el caso del método pasivo este sistema recibe la luz que el cuerpo u objeto del que se está estudiando. En otros casos donde el objeto no refleje radiación es necesario colocar una fuente de radiación sobre este. La fuente de radiación puede ser luz estructurada, luz blanca o cualquier otro tipo de radiación que el sistema óptico pueda detectar.

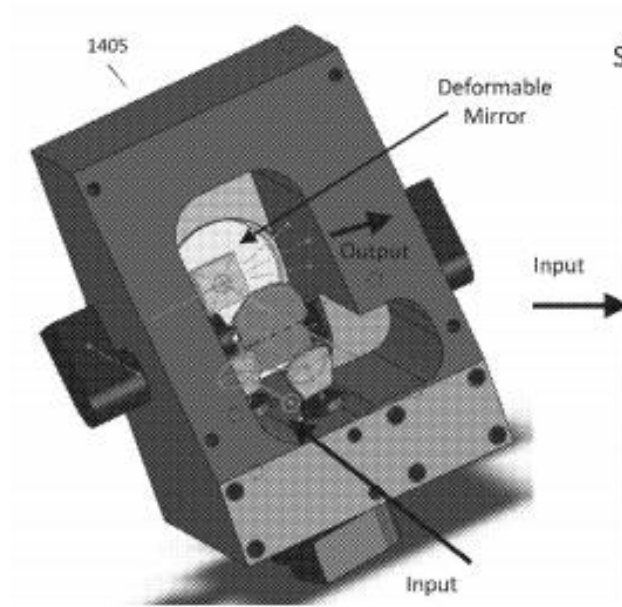
El otro método mencionado corresponde al método activo, el cual consiste en proyectar una radiación, por ejemplo, un haz de luz láser sobre la superficie u objeto bajo estudio.

Una de los principios que se utilizan para obtener las coordenadas de un objeto aplicando el método consiste en detectar el tiempo de vuelo *ToF* es decir que se toma la lectura de la duración del periodo desde que se envía la luz hasta que retorna debido al reflejo en el objeto. La relevancia de estas metodologías es que es muy común y se harán presentes a lo largo del desarrollo de este trabajo.

### 2.5.2. Revisión documental de patentes

Existen diseños de sistemas ópticos que permiten adaptarse y superar desafíos de dispositivos ópticos tradicionales como lentes y espejos (Estados Unidos Patente nº US 9.200,887 B2, 2013). La siguiente Ilustración 6 muestra un dispositivo que es utilizado para el escaneo óptico la cual contiene elementos similares a los del presente estudio. Es importante precisar que este gráfico consta de elementos ópticos que son estándar dentro del contexto de los sistemas de barrido. Los principales elementos que estos comprenden son los siguientes: un espejo giratorio, el cual sirve para realizar el barrido óptico, fotosensores que sirven para la detección de la luz o radiación de objetos bajo

estudio. Debido a esto es importante hacer una revisión documental sobre patentes ya que estos forman parte indispensable en distintas aplicaciones sobre todo en el sector industrial como en el de negocios (Quintella, 2011) (Fu, 2014).



**Ilustración 6. Elementos de un sistema óptico de barrido.**

La revisión documental realizada en esta investigación fue llevada a cabo a partir de diversas patentes relacionadas o semejantes a los métodos que utilizan fuentes de luz tanto coherentes, como incoherentes. En el caso de las patentes de interés en este trabajo son las que se llevan a cabo para mediciones ópticas.

Los criterios para realizar la búsqueda de patentes fueron los siguientes:

1. Buscar en las bases de datos como:

<https://siga.impi.gob.mx/>  
<https://patentscope.wipo.int/search/es/search.jsf>  
<https://www.epo.org/searching-for-patents.html>  
<https://www.scopus.com/>  
<https://patents.google.com/>  
<https://www.uspto.gov/patents-application-process/search-patents>  
<https://www.oepm.es/es/index.html>  
<https://www.lens.org/>  
<https://insight.rpxcorp.com/>

2. Selección de las palabras clave.
3. Selección del idioma inglés

En esta revisión documental se analizan principalmente los avances relacionados a los sistemas de ópticos de barrido. También otro de los propósitos es identificar alternativas que permitan aumentar el rendimiento de la patente MX2014000647 (propiedad de UABC). Con esto se pueden resaltar varios puntos importantes que dan referencia para mejorar la patente previamente descrita.

En la siguiente Tabla 2, se puede resaltar que existe una gran tendencia para utilizar dispositivos laser para las mediciones ópticas. Gran parte de las patentes analizadas consideran el método activo como el sistema de referencia para irradiar al objeto bajo estudio.

Otro punto interesante consiste en la posibilidad realizar un rediseño del espejo giratorio de una cara por uno en forma hexagonal u octagonal. A partir del análisis realizado los sistemas de escaneo que son actualmente desarrollados se puede resaltar que se está marcando una tendencia al utilizar luz estructurada para poder realizar las mediciones ópticas. Mediante esta técnica es posible aumentar la resolución y precisión para realizar mediciones geométricas.

Tabla 2. Desarrollo de tecnología basado en sistemas ópticos.

Patente	Tecnología	País	Aplicación(es)	Año
MX2014000647	Láser, o luz incoherente como LED's	México	Escáner para medición de coordenadas 3-D	2016
US10801843b2	Láser como fuente de luz	EUA	Sistema de posicionamiento para un robot móvil	2020
US 8929412b2	Láser como fuente de luz	EUA	Fotocopiadoras, impresoras láser y plotters.	2015
US 8077369b2	Láser como fuente de luz	EUA	Impresoras láser	2011
US 9665052b2	Láser y LEDs	EUA	Detección de toner (Impresoras láser)	2017
US 10812694b2	Láser y LEDs	EUA	Escáner para medición de coordenadas 3-D	2020
US 9661295b2	Láser como fuente de luz	EUA	Escáner para medición de coordenadas 3-D	2017
US 10670395b2	Láser como fuente de luz	EUA	Sistema escáner 3-D de objetos.	2020
US 9476695b2	Láser como fuente de luz	EUA	Escáner para medición de coordenadas 3-D	2016
US 9967545b2	Láser y luz proyectada	EUA	Sistema escáner 3-D de objetos.	2018
US2018/0360317 A1	Láser y luz blanca.	EUA	Modelo virtual 3-D de objetos.	2018
US9696146b2	Láser.	EUA	Sonda de exploración óptica.	2017
US2020/0033500 A1	Láser	EUA	Sistema escáner 3-D de objetos.	2020
US2017/0094251 A1	Láser y LEDs	EUA	Sistema de medición tridimensional (3D)	2017
US10,516,876B2	Láser	EUA	Sensor de visión dinámico.	2019
US 7,859,600 B2	Láser	EUA	Proyector de imagen en 2 -D	2010
US 2006/0158666 A1	Diferentes tipos de fuente de luz	EUA	Sistema escáner 3-D de objetos.	2006
US 10,921,118 B2	Luz estructurada	EUA	Escáner para medición de coordenadas 3-D	2021
KR101162439B1	Láser	Corea del Sur	Escáner para medición de coordenadas 3-D	2020
US 10 , 274 , 312 B2	Luz blanca	EUA	Perfilómetro sin contacto	2012
US 9.279,662 B2	Láser	EUA	Escáner para medición de coordenadas 3-D	2019
JP2006516719A	Láser	Japón	Sistema escáner 3-D de objetos.	2016
US 9.228,816 B2	Láser	EUA	Escáner para medición de coordenadas 3-D	2006
US 10,598,479 B2	Láser, luz estructurada, Sonda laser	EUA	Escáner para medición de coordenadas 3-D	2016
JP2009085741A	Láser y luz blanca.	Japón	Escáner para medición de coordenadas 3-D	2020
KR101703774B1	Láser	Corea del Sur	Sistema escáner 3-D de objetos	2009
JP5832629B2	Láser	Japón	Sistema escáner 3-D de objetos	2017
US 9,113,154 B2	Láser	EUA	Escáner para medición de coordenadas 3-D	2015
KR101162439B1	Láser	Corea del Sur	Sistema escáner 3-D de objetos	2015

Es importante precisar que el interés de este trabajo se centra principalmente en los desarrollos tecnológicos en los métodos de barrido, diseños ópticos, así como también innovaciones que permitan mejorar la resolución y precisión en términos metrológicos.

La Ilustración 7 muestra el origen de las patentes analizadas en el presente trabajo. El mayor porcentaje pertenece al origen de los Estados Unidos el cual representa el 73% de las patentes analizadas. La segunda representación corresponde al país de Japón el cual conforma el 14 % del total de las patentes analizadas. En tercer lugar, está representado por Corea del Sur con un 7% del total de las patentes. Dado que el proyecto base del presente trabajo es de

México, incluimos esta patente. La patente mexicana representa el mismo porcentaje de una patente de origen alemán registrado en la European Patent Application con un 3%.

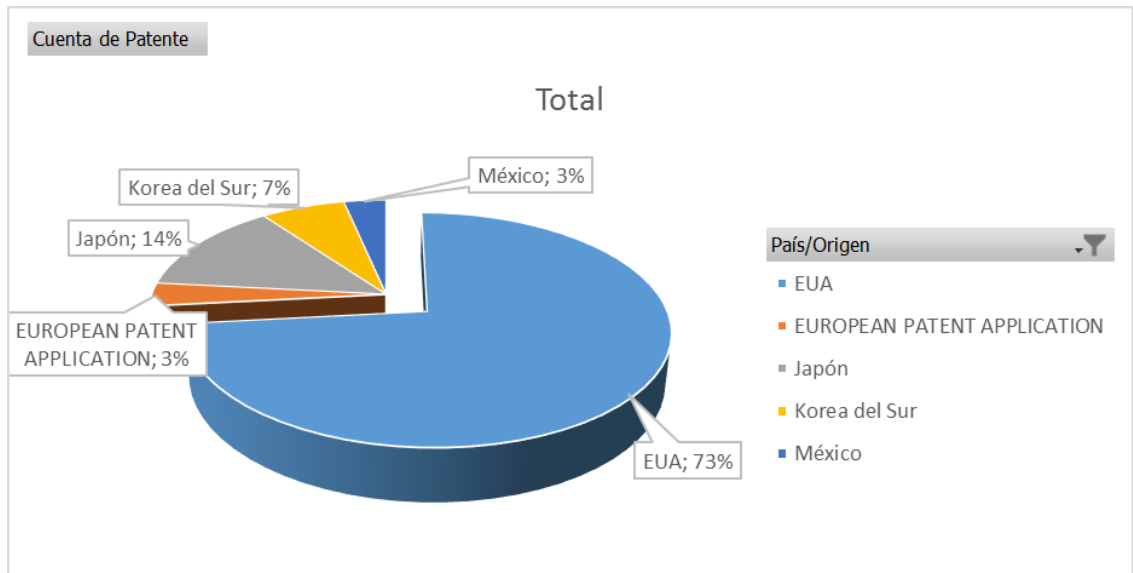


Ilustración 7. Origen de las patentes por país de la revisión de patentes realizado en este trabajo.

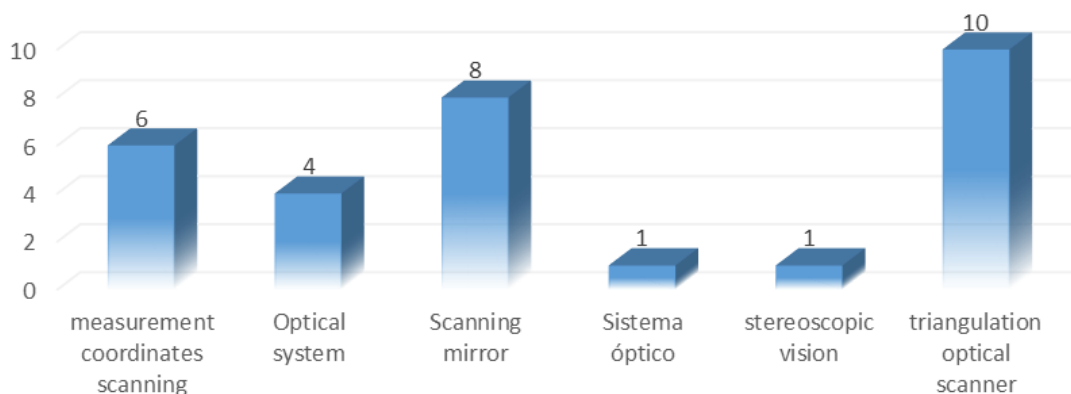


Ilustración 8. Análisis gráfico considerando las palabras clave.

En la Ilustración 8 se detallan los hallazgos de las patentes considerando las palabras clave. La palabra “*triangulation optical scanner*”, tiene mayores resultados, seguido de “*scanning mirror*” y “*measurement coordinates scanning*” con 10, 8 y 6 veces respectivamente. Si bien es cierto que las aplicaciones del presente trabajo están basadas en sistemas que realizan mediciones

optoelectrónicas o barridos ópticos, es importante mencionar que para facilitar la búsqueda tecnológica referente a los sistemas de barrido es indispensable considerar estas palabras claves, ya que ayudan a ubicar o distinguir la tecnología de sistemas de visión en una base de datos internacional. Los sistemas de búsqueda en español están muy limitados. Indudablemente el idioma inglés o las patentes creadas en Estados Unidos pueden ser mejor publicadas por los motores de búsqueda.

### 2.5.3. Clasificación de las tecnologías para la medición de la profundidad.

Las principales características sobre la tecnología que se utiliza para medir la profundidad y que permite las mediciones en forma pasiva son que están basadas en algoritmos computacionales o aprendizaje automático ML (*Machine Learning*). Esta clase se puede dividir en estero, forma y estructura de movimiento.

### 2.5.4. Sistema de visión estéreo

A los sistemas de visión estéreo también se les conoce como visión estereoscópica. En un sistema de visión estéreo la relación entre la profundidad y la disparidad puede expresarse mediante la siguiente ecuación.

$$d = b * f / z \quad \text{Ec.(21)}$$

Donde  $b$  es la línea base,  $f$  es la longitud focal,  $z$  es para la profundidad y  $d$  es la disparidad. La idea básica del cálculo de la disparidad es la comparación de cada pixel de la misma escena que es generada por dos cámaras. Luego con esto se obtiene la diferencia en coordenadas de dos imágenes semejantes de una misma escena. A partir de lo anterior se puede definir a la disparidad como la diferencia de un pixel en la imagen izquierda con respecto a la posición de la

imagen derecha. La disparidad en conjunto con el principio de triangulación geométrica es importante para determinar la profundidad.

En la siguiente Ilustración 9 se muestran los elementos que forman la geometría del plano epipolar en el cual se basan los sistemas de visión estéreo.

Dónde:

$O_R$  y  $O_T$  corresponden a los centros de proyección,  $P$  y  $P'$  son proyecciones de un punto del objeto bajo observación.

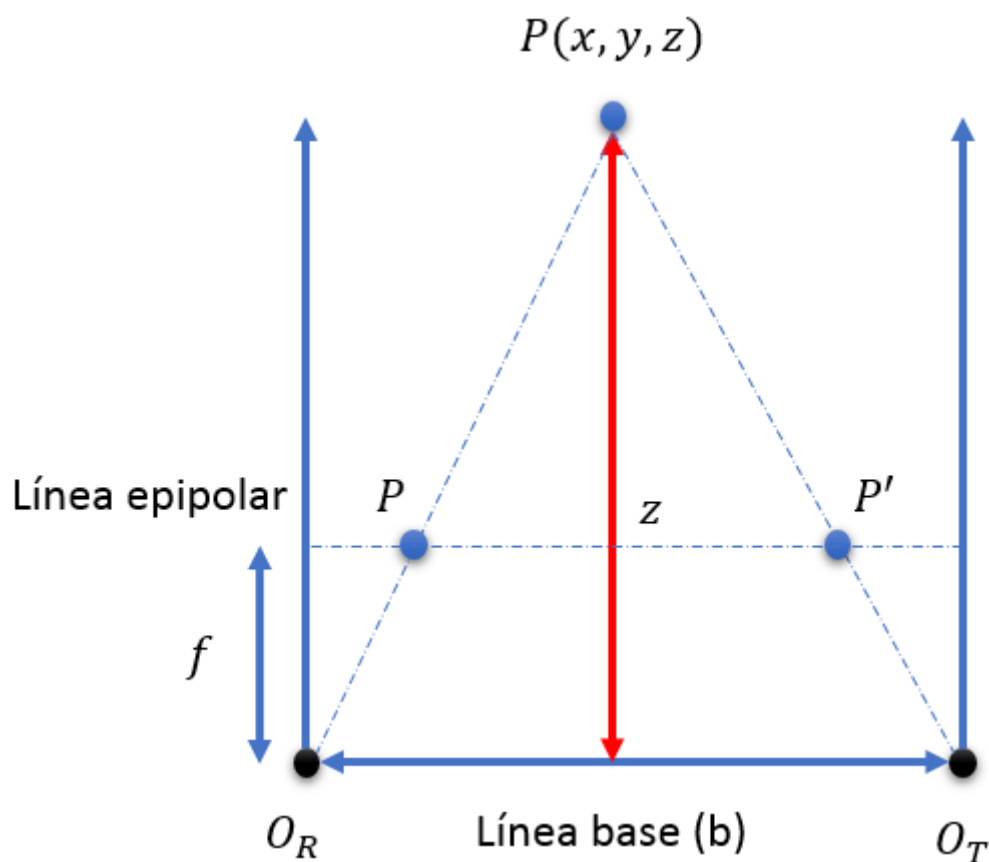


Ilustración 9. Plano epipolar

El rango de profundidad máximo detectable es proporcional a la línea de base (b) y la resolución del sensor. La resolución de profundidad final está limitada principalmente por errores de calibración y coincidencia (ams OSRAM Group, 2021).

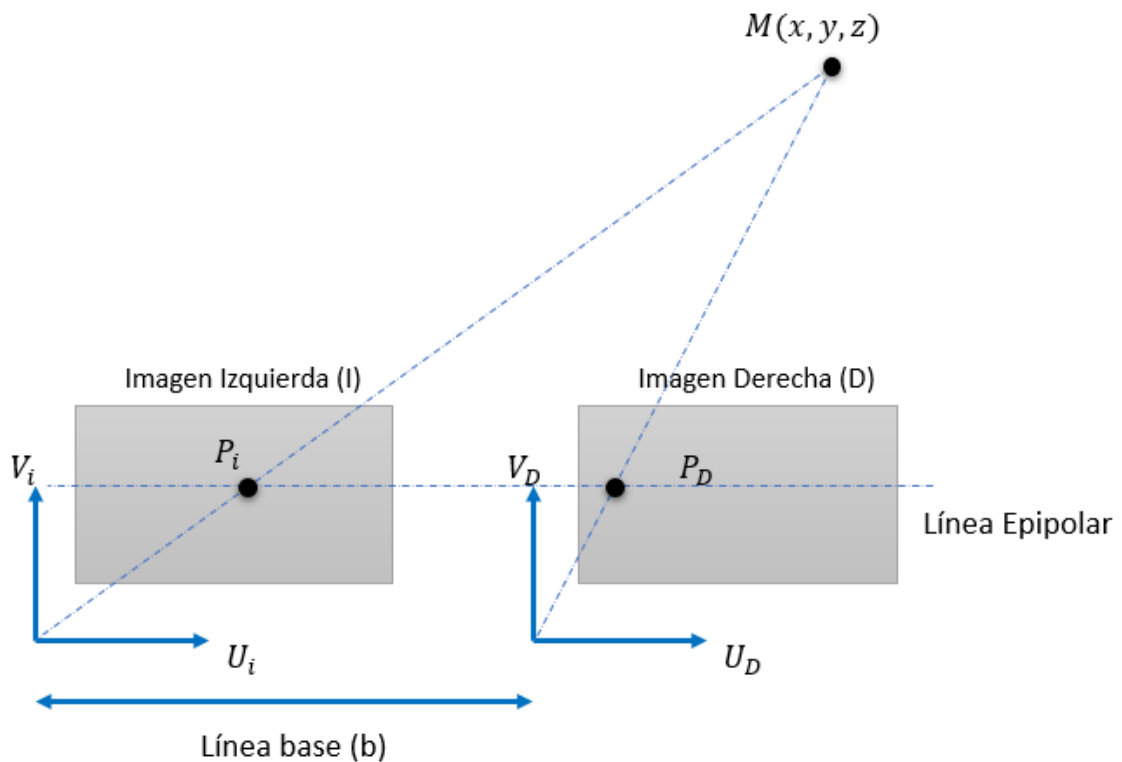
Los algoritmos para comparar las escenas estéreo corresponden a las que se presentan en la siguiente Ilustración 10.



Ilustración 10. Clasificación del emparejamiento estéreo.

Al conjunto de todas las disparidades de los píxeles se le conoce como mapa de disparidad.

A partir de la configuración de las cámaras paralelas (Medina Naranjo, 2012) se tiene la siguiente configuración.



**Ilustración 11. Geometría de cámaras paralelas.**

Si se considera la semejanza de triángulos, es decir su relación geométrica para la imagen izquierda.

$$\frac{u_i}{f} = \frac{x}{z}; \quad x = \frac{u_i}{f} z \quad \text{Ec.(22)}$$

$$\frac{v_i}{f} = \frac{y}{z}; \quad y = \frac{v_i}{f} z \quad \text{Ec.(23)}$$

Para el caso de la imagen derecha las razones trigonométricas pueden expresarse de la siguiente forma.

$$\frac{u_d}{f} = \frac{-x + b}{z}; \quad x = -b + \frac{u_d}{f} z \quad \text{Ec.(24)}$$

$$\frac{v_d}{f} = \frac{y}{z}; \quad y = \frac{v_d}{f} z \quad \text{Ec.(25)}$$

Si se igualan las ecuaciones (24) y (25)

$$\frac{u_i}{f} z = -b + \frac{u_d}{f} z \quad \text{Ec.(26)}$$

Las coordenadas del punto M pueden calcularse mediante las siguientes ecuaciones.

$$z = \frac{fb}{d} \quad \text{Ec.(27)}$$

$$x = \frac{bu_i}{d} \quad \text{Ec.(28)}$$

$$x = \frac{bv_i}{d} \quad \text{Ec.(29)}$$

Donde:

$u_i$  y  $v_i$  corresponden a las proyecciones del punto P en el espacio, sobre el plano de la imagen izquierda.

### **El procedimiento para la reconstrucción de una escena.**

El procedimiento que se considera en la presente tesis para llevar a cabo la reconstrucción de una escena consiste en:

- a) Captura de las imágenes.
- b) Calibración de las cámaras.
- c) Rectificación de imágenes.
- d) Correspondencia de imágenes.
- e) Determinar el mapa de disparidades.

La **captura de las imágenes** es sin duda uno de los pasos más importantes para realizar la reconstrucción de una escena. Este proceso es llevado en ambientes controlados para poder disponer de una iluminación conveniente para los experimentos que se lleven a cabo.

La **calibración de las cámaras** corresponde al proceso en donde son calculados parámetros intrínsecos y extrínsecos de las cámaras usadas. Los parámetros intrínsecos son la longitud focal, el centro óptico y los coeficientes de distorsión radial de la lente. En cuanto a los parámetros extrínsecos de la cámara estos se refieren a la orientación de la cámara con respecto a un marco de referencia de un sistema de coordenadas. Para un mejor entendimiento sobre

el proceso de calibración de la cámara en Ilustración 12 se muestra a detalle el flujo a seguir para encontrar los parámetros de la cámara.

## Diagrama de flujo para la calibración de la cámara

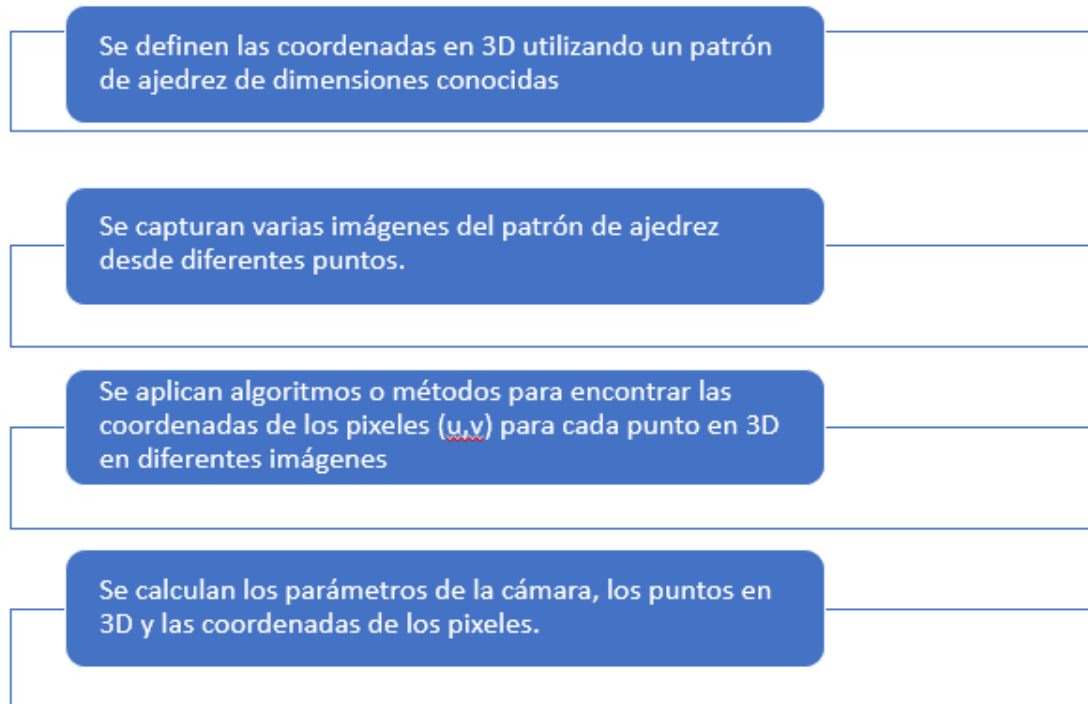


Ilustración 12. Diagrama de flujo de para el proceso de calibración de una cámara.

La rectificación de imágenes consiste en transformar las imágenes del par estéreo haciendo que las líneas epipolares coincidan con las filas de la imagen (Revelo-Luna, 2012).

### Implementación del sistema de visión estéreo.

En la siguiente imagen Ilustración 13, se muestra la cámara Acteck que fue usada para realizar los experimentos de visión estéreo.



**Ilustración 13. Cámara Acteck usada**

## Capítulo 3. Marco Teórico

El aseguramiento de las mediciones y confiabilidad que ofrecen los instrumentos tienen en la actualidad un rol importante en el desempeño de los productos (López, 2008). Los instrumentos de medición, así como la confiabilidad metrológica de su calibración, a partir de uso de softwares y sistemas computarizados, se tornan grandes desafíos para la metrología industrial (Vásquez, 2020). En esta sección se abordarán los fundamentos que son empleados para realizar las mediciones y ensayos. En primera instancia se describirán los conceptos importantes para llevar a cabo la metrología correspondiente a los sistemas ópticos de barrido.

### 3.1. Generalidades sobre el diseño de experimentos

El objetivo principal de esta sección es presentar y detallar las generalidades sobre el diseño de experimentos. Mediante el diseño de experimentos se pueden

conseguir entre otras cosas, mejorar el rendimiento de un proceso, reducir la variabilidad o los costos de producción, así como aumentar la calidad de los productos o servicios (Pablo, 2008).

Los experimentos pueden ser usados para estudiar el rendimiento de los procesos o sistemas (Marzbanrad, 2013). Para definir mejor lo que es un proceso, en la siguiente Ilustración 14 se puede apreciar los elementos que le dan forma. Dicho modelo está integrado por entradas y salidas las cuales comúnmente se identifican mediante 'x' y 'y', respectivamente. Además, este modelo está representado por medio de variables las cuales pueden ser controlables como  $X_1, X_2, \dots, X_p$ . Las variables o factores  $Z_1, Z_2, \dots, Z_q$  son aquellas que no se pueden controlar.

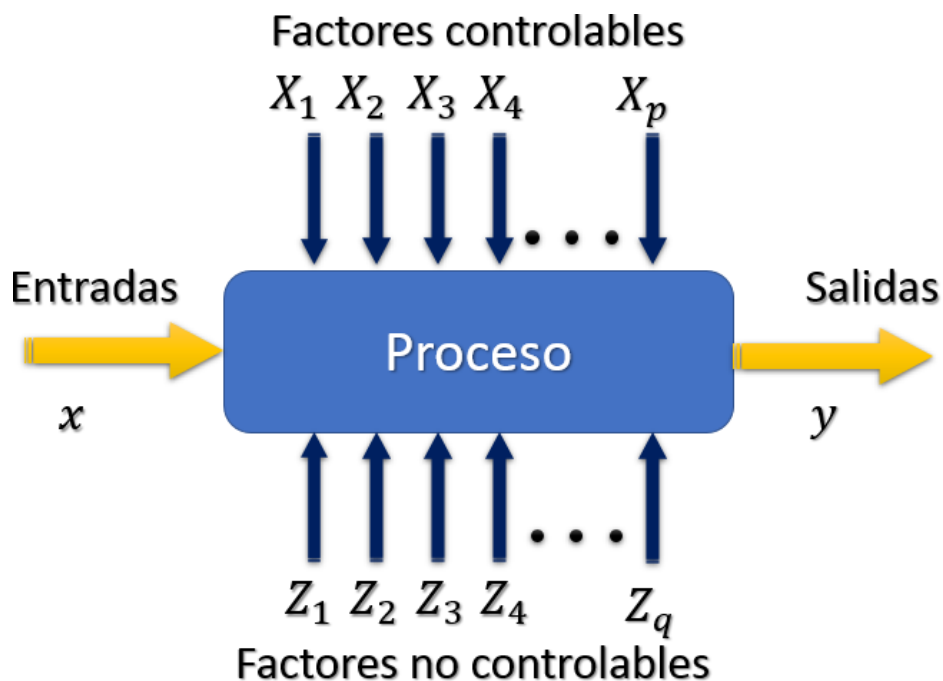


Ilustración 14. Modelo general de un proceso.

Los objetivos de los experimentos consisten en:

- Determinar cuáles variables son las que más influyen la variable de respuesta y.

- Determinar dónde establecer las variables de entradas  $X$ 's influncien a que la variable de respuesta  $y$  este casi siempre cerca del valor nominal deseado.
- Determinar dónde establecer las variables de entradas  $X$ 's influncian a que la variabilidad en la respuesta de salida  $y$ , sea menor.
- Determinar dónde establecer las variables de entradas  $X$ 's influyan en que los efectos de las variables no controlables  $Z_1, Z_2, \dots, Z_q$  sean minimizadas.

Para entender mejor el diseño estadístico de experimentos (DOE, de sus siglas en inglés *design of experiments*), en esta sección se tiene como objetivo presentar las generalidades y conceptos básicos para su mejor entendimiento.

En el contexto histórico sobre diseño de experimentos se le considera a Sir Ronal Fisher como el genio quien creo los fundamentos sobre esta herramienta. Este conjunto de técnicas tiene como objetivo optimizar métodos, costos o tiempos minimizando o reduciendo la extensión de los experimentos a un nivel estadísticamente relevante (Kleppmann, 2003).

Uno de los primeros pasos para determinar si es posible implementar el diseño de experimentos es respondernos la siguiente pregunta: ¿Cuándo usar DOE? (JMP, 2021).

- Determinar si un factor, o una colección de factores, tiene un efecto sobre la respuesta.
- Determinar si los factores interactúan en su efecto sobre la respuesta.
- Modelar el comportamiento de la respuesta en función de los factores.
- Para optimizar la respuesta.

En la siguiente Ilustración 15 se muestran los distintos tipos de diseño de experimentos que sirven para mejorar los procesos o sistemas.

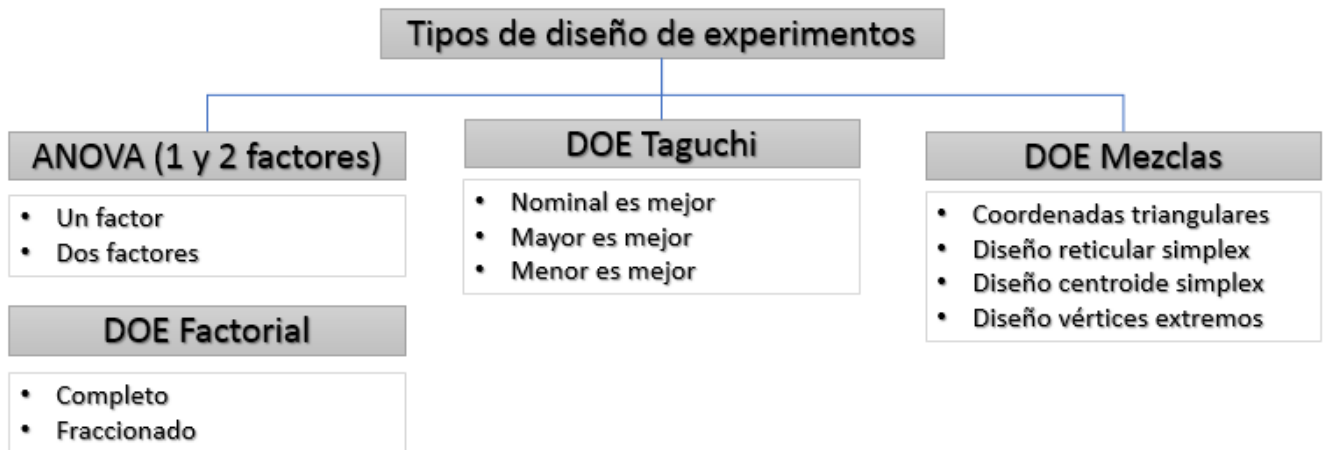


Ilustración 15. Tipos de diseño de experimentos.

**Factor** consiste en una variable experimental que puede ser combinada por el diseñador de experimentos. Las variables experimentales pueden ser la temperatura, humedad, presión solo por mencionar algunas. En el caso del presente trabajo la frecuencia de escaneo, el orden del filtro digital, tipo de filtro, etc.

**Niveles:** Los niveles son el conjunto de valores específicos de los factores que se utilizan para poder llevar a cabo la experimentación.

**Respuesta:** esta variable es la que requiere ser medida por el diseñador, la cual depende de los factores seleccionados para realizar el estudio. En el caso del presente trabajo la precisión y el tiempo de ejecución del sistema óptico son tomados en cuenta.

### 3.1.1. Diseño factorial

En un diseño factorial las influencias de todas las variables experimentales, factores, y la interacción de los efectos en la respuesta o respuesta son investigados (Eldin, 2011). De acuerdo a (Montgomery, 2005), un diseño

factorial se entiende que en cada ensayo o réplica completa del experimento se investigan todas las combinaciones posibles de los niveles de los factores.

Si las combinaciones de  $k$  factores se implementan a dos niveles, un diseño factorial consistirá en  $2^k$  experimentos. Para el caso en que se investiguen 3 variables se realizarían 8 experimentos y para 4 se tendrían que realiza  $2^4 = 16$  experimentos. Para mejores detalles véase la siguiente Tabla 3, donde se muestran los diseños factoriales para 2, 3 y 4 variables experimentales.

Tabla 3. Diseños factoriales para 2, 3 y 4 variables experimentales.

Dos variables			Tres variables				Cuatro variables				
# Experimento	Variables		# Experimento	Variables			# Experimento	Variables			
	$x_1$	$x_2$		$x_1$	$x_2$	$x_3$		$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$
1	-	-	1	-	-	-	1	-	-	-	-
2	+	-	2	+	-	-	2	+	-	-	-
3	-	+	3	-	+	-	3	-	+	-	-
4	+	+	4	+	+	-	4	+	+	-	-
			5	-	-	+	5	-	-	+	-
			6	+	-	+	6	+	-	+	-
			7	-	+	+	7	-	+	+	-
			8	+	+	+	8	+	+	+	-
							9	-	-	-	+
							10	+	-	-	+
							11	-	+	-	+
							12	+	+	-	+
							13	-	-	+	+
							14	+	-	+	+
							15	-	+	+	+
							16	+	+	+	+

Donde los niveles de los factores están dados por - (menos) para el nivel bajo y + (más) para el alto nivel.

### 3.1.2. Identificación de las fuentes de incertidumbre

La **incertidumbre** y los resultados de los experimentos son parte importante para caracterizar el comportamiento de un sistema. La incertidumbre en una medición que puede determinar la validez de los experimentos realizados. Por esta razón cobra relevancia identificar cuáles son los factores o fuentes son las que intervienen. A continuación, se realizará una descripción de dichas fuentes.

Una vez determinados el mensurando, el principio, el método y el procedimiento de medición, se identifican las posibles fuentes de incertidumbre. Éstas provienen de los diversos factores involucrados en la medición, por ejemplo (Schmid, 2000).

1. Los resultados de la calibración del instrumento;
2. La incertidumbre del patrón o del material de referencia;
3. La repetibilidad de las lecturas;
4. La reproducibilidad de las mediciones por cambio de observadores, instrumentos u otros elementos;
5. Características del propio instrumento, como resolución, histéresis, deriva, etc.;
6. Variaciones de las condiciones ambientales;
7. La definición del propio mensurando;
8. El modelo particular de la medición; · variaciones en las magnitudes de influencia.

Para el proceso de validación intralaboratorio existen dos métodos de desempeño los cuales corresponden a la variabilidad de la medición en condiciones de repetibilidad ( $s_r$ ) y a la variabilidad de los resultados de la medición en condiciones de reproducibilidad ( $s_R$ ). La variabilidad puede ser expresada mediante la Ec.(30).

$$s_{tot} = \sqrt{\frac{s_r^2}{n} + s_R^2} \quad \text{Ec.(30)}$$

Donde:

$s_r$  = desviación estándar o precisión en condiciones de repetibilidad.

$s_R$  = desviación estándar o precisión en condiciones de reproducibilidad.

$s_{tot}$  = variabilidad combinada total.

$n$  = es el número de resultados repetidos que se promedian dentro de una sola medición completa.

Los estimados de  $s_r$  y  $s_R$  se pueden obtener por medio de la técnica estadística **análisis de varianza de un factor**.

En la Ec.(31) se muestra la ecuación para calcular la desviación estándar de precisión intermedia en la cual se pueden presentar distintos factores como el tiempo, analista y equipo usado. Estos factores son representados mediante subfijos, por ejemplo  $s_{I(T)}$  indica que el factor que varía es el tiempo, así mismo  $s_{I(TAE)}$  indica que los factores considerados para estimar la desviación estándar corresponden al tiempo, analista y equipo.

$$s_{I( )} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (y_k - \bar{y})^2} \quad \text{Ec.(31)}$$

Donde:

$k$  = Es el número de mediciones realizadas.

$y_k$  =  $k$ -ésimo resultado de las  $n$  replicas de la medición.

$n$  = es el número de réplicas de la medición.

$\bar{y}$  = promedio de las  $n$  replicas.

La incertidumbre también puede expresarse a partir de los errores de las mediciones experimentales. Por ejemplo, en la Ec.(32) se define el error de la medida el cual está determinado por la diferencia entre el valor medido y el valor real.

$$\varepsilon = X_{med} - X_{real} \quad \text{Ec.(32)}$$

Los errores en las mediciones pueden ser clasificados como errores sistemáticos y errores accidentales. Las fuentes de los errores sistemáticos pueden ser

originadas por el método de medición o por instrumento. Un claro ejemplo de estos errores corresponde al error de cero el cual se origina en las balanzas al no ajustar correctamente el cero por defecto de los brazos.

Los errores accidentales son aquellos que dependen de factores externos como las condiciones ambientales como cambios en la temperatura, presión, viento, vibraciones mecánicas. Estos tipos de errores tienen la característica de que son difíciles de controlar y pueden alterar los resultados de las mediciones. Es importante mencionar que para tratar a estos errores se realiza la hipótesis de que estos se distribuyen al azar.

### 3.2. Métodos de defusificación

Una de las técnicas que fueron usadas en el desarrollo de la presente tesis, corresponde al método de defusificación el cual puede ser clasificado en cuatro categorías:

1. Las que proveen un valor real,
2. Las que proveen un intervalo real,
3. Las que permiten el manejo de distribuciones y finalmente
4. Los métodos que prueban la dispersión.

Es importante mencionar que los sistemas ópticos utilizados en el presente trabajo toman como referencia la señal gaussiana capturada de una señal opto-eléctrica. La información de señal que es de interés para medir la posición angular se presenta en el máximo local, es decir en el pico de la señal.

El método de defusificación se asocia con la media y valores máximos de una señal de la distribución global de la señal, de aquí proviene el interés de la presente tesis para realizar comparaciones entre los métodos que se utilizan

para medir la posición angular. Los métodos son los siguientes: centro de gravedad CoG (*center of gravity*), bisector de area BoA (*bisector of area*), SoM máximo más pequeño (*smallest of maximum*), máximo más grande LoM (*largest of maximum*) y media máxima MoM (*mean of maximum*).

Antes de definir los métodos de defusificación es importante mencionar algunos conceptos básicos como la función de membresía la cual puede ser expresada como una curva que define cómo cada punto en el espacio de entrada es asignado a un valor de membresía entre los valores 0 y 1.

### 3.2.1. Centro de Gravedad (CoG)

El primer método mencionado corresponde al método de centro de gravedad CoG el cual consiste en encontrar el centro del área a lo largo de la curva para los intervalos a y b, la cual puede ser descrita por la siguiente ecuación.

$$z^* = \frac{\sum_a^b \mu(z)z}{\sum_a^b \mu(z)} \quad \text{Ec.(33)}$$

Donde  $z^*$  representa la salida nítida o clara,  $\mu(z)$  corresponde a la función de membresía y  $z$  la variable de salida.

### 3.2.2. Bisector de Área (BoA)

El segundo método utilizado en la presente tesis como localizador del máximo local corresponde a bisector de área. Este método utiliza líneas verticales que dividen la región de interés en dos partes o subregiones de igual área. Este método opera bajo la siguiente condición.

$$\int_{\alpha}^{x^*} \mu_A(x) dx = \int_{x^*}^{\beta} \mu_A(x) dx \quad \text{Ec.(34)}$$

dónde

$$\alpha = \min\{x|x \in X\} \text{ y } \beta = \max\{x|x \in X\} \quad \text{Ec.(35)}$$

### 3.2.3. Máximo más pequeño y máximo más grande (SoM y LoM)

El tercer y cuarto método de defusificación corresponde a SoM y LoM que son de los métodos más comunes. Estos métodos están basados en el criterio máximo.

### 3.2.4. Método de la media máxima MoM

El último método de defusificación utilizado en este trabajo corresponde a MoM, el cual busca un resultado plausible. La salida de este método puede ser calculada mediante la siguiente ecuación.

$$z^* = \sum_{j=1}^k \frac{z_j}{k} \quad \text{Ec.(36)}$$

### 3.2.5. Método del máximo

También se puede mencionar el método del máximo sin embargo este método no resulta ser optimo dado que este valor puede ser alcanzado por varias salidas.

### 3.3. Métodos de filtrados digitales a imágenes

En esta sección se revisan los principales filtros digitales que son ampliamente utilizados en el procesamiento de imágenes. Se puede definir un filtro digital desde el contexto de procesamiento digital de imágenes como una operación de convolución de una imagen digital que tiene como finalidad aislar o destacar elementos de interés. Los filtros aplicados a las imágenes operan sobre cada píxel y su resultado dependerá principalmente de los píxeles de su entorno. Estos pueden ser utilizados para distintos objetivos: por ejemplo, se pueden mencionar los siguientes cuatro:

1. **Suavizar una imagen:** es decir reducir las variaciones de intensidad entre píxeles vecinos.
2. **Detectar bordes:** detectar aquellos píxeles donde se produce un cambio brusco en la función intensidad.
3. **Eliminar ruido:** modificar aquellos píxeles cuyo nivel de intensidad es muy diferente al de sus vecinos.
4. **Realzar la imagen:** aumentar las variaciones de intensidad, allí donde se producen.

Los filtros pueden ser en el dominio del espacio o en el dominio de la frecuencia. Un ejemplo de los tipos de filtros frecuenciales se encuentran el Filtrado paso bajo gaussiano, el enventanado de Kaiser y el enventanado de Hamming y en el caso de los filtros espaciales se encuentran el filtro de la mediana (Castillo, 2013). El filtro bilineal es un tipo de filtro adaptivo que, así como el filtro gaussiano son considerados como filtros espaciales (Ramírez Giraldo, Fletcher, & Mccollough, 2010).

Los filtros espaciales se implementan mediante un proceso llamado convolución espacial. También a estos se les conocen como filtros en el dominio del espacio. Una de las principales características es la de resaltar las transiciones abruptas de una imagen como el borde de un objeto. Estos filtros se basan principalmente en operación matemática la cual se aplica directamente a

la imagen y no a una transformada de la misma. Este tipo de filtrado el nivel de gris queda en función del valor de la vecindad del pixel de interés.

Los **filtros digitales** hacen uso de ventanas como la que se muestran en el siguiente Ilustración 16. Los pixeles sombreados representan la entrada de la ventana que produce el valor filtrado para la locación correspondiente en la imagen de salida. Cada posible posición de la ventana genera un valor correspondiente de pixel en la salida de la imagen.

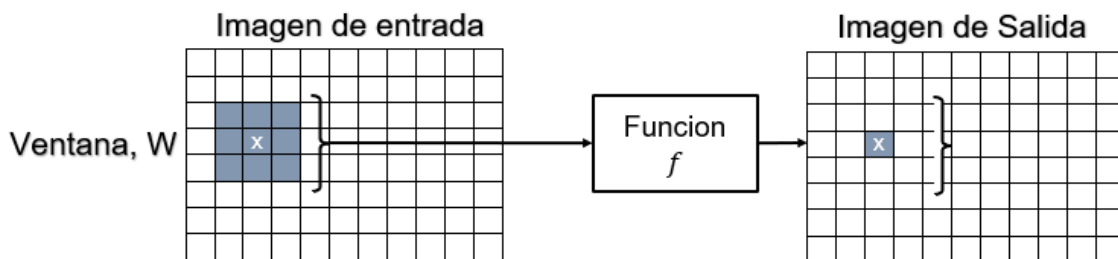


Ilustración 16. Aplicación de ventanas en el proceso de filtrado digital.

El grupo de píxeles utilizados en el cálculo del promedio ponderado se conoce como núcleo (kernel) o matriz.

### 3.3.1. Filtros Gaussiano, Bilateral y de la Mediana

Aunque existen muchos tipos de filtros digitales aplicados a imágenes en la literatura, en el presente trabajo fueron utilizados el filtro gaussiano, el filtro de la mediana y el filtro bilateral por dar resultados convenientes y satisfactorios.

Un filtro gaussiano tiene dos parámetros: el tamaño de la ventana y la desviación estándar, si el valor de la desviación estándar es grande el efecto de suavizado de la imagen será más grande. Este filtro está definido por la siguiente ecuación.

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}$$

Ec.(37)

El filtro de la mediana es un filtro no lineal que de acuerdo a su nombre toma la mediana de todos los pixeles de una ventana y reemplaza el elemento central con su mediana.

$$f(x, y) = \underset{(s,t) \in S_{xy}}{\text{mediana}}\{g(s, t)\}$$

Ec.(38)

El filtro Bilateral, a diferencia de los anteriores no suaviza los bordes sino más bien los conserva. El primer termino  $\frac{1}{W_p}$  corresponde a un factor de normalización y los siguientes dos términos consideran al mismo tiempo el peso de los píxeles en función de la distancia espacial desde el píxel central, así como la diferencia de intensidad.

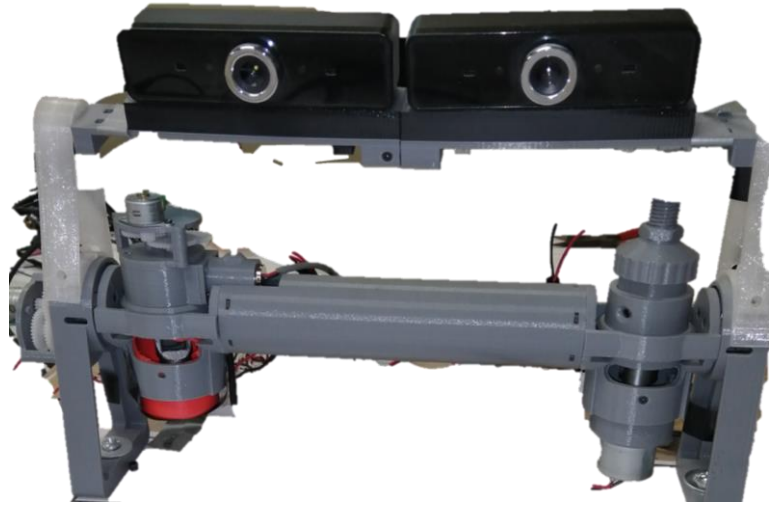
$$BF[I]_p = \frac{1}{W_p} \sum_{q \in S} G_{\sigma_s}(\|p - q\|) G_{\sigma_r}(\|I_p - I_q\|) I_q$$

Ec.(39)

# Capítulo 4. Metodología de la Experimentación y Resultados

## 4.1. Resultados con el Sistema de visión 1

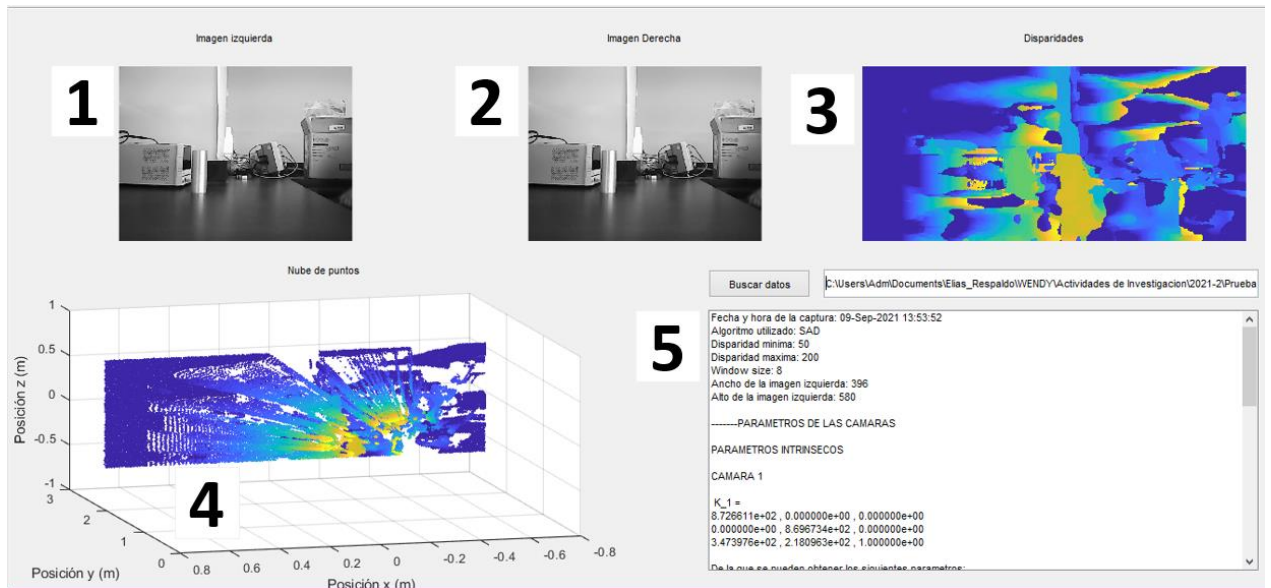
En esta sección se muestra el contexto sobre los experimentos realizados con el sistema de visión estéreo 1 montado sobre un sistema de barrido óptico. En la siguiente Ilustración 17 se muestra el prototipo en desarrollo por estudiantes de posgrado del Instituto de Ingeniería UABC. En la parte posterior se muestran dos cámaras las cuales componen el sistema de visión estéreo. En la parte central izquierda (objeto en color rojo) se encuentra un espejo giratorio el cual se encuentra a 45 grados respecto a la normal. En el cilindro central se encuentra un dispositivo laser. En el otro extremo del objeto en color rojo se encuentra un espejo giratorio el cual refleja la luz radiante captada hacia una lente para enfocar la energía hacia el fotosensor del sistema TVS. La idea principal de integración de estos dos sistemas consiste en incrementar las posibilidades para determinar las coordenadas geométricas de objetos bajo estudio en menor tiempo y con mayor exactitud simultáneamente.



**Ilustración 17. Sistema de visión estéreo 2.**

Por otro lado, el experimento realizado con este dispositivo fue llevado a cabo en el laboratorio de optoelectrónica y en Ilustración 18 se puede apreciar los detalles técnicos capturados. En la parte superior izquierda se observan dos imágenes 1 y 2 que representan la escena obtenida por las dos cámaras. En el centro de la imagen se aprecia un objeto de referencia el cual corresponde a un cilindro de aluminio el cual fue colocado a una distancia aproximada de 1m de acuerdo al medidor láser. Las imágenes en color 3 y 4 representan el mapa de disparidad y la nube de puntos respectivamente, en estas dos imágenes se puede apreciar en color amarillo la profundidad más cercana de los objetos que aparecen en la escena. En color azul se muestran los objetos más lejanos.

La caja de texto muestra la configuración llevada, así como los parámetros obtenidos intrínsecos de las cámaras mediante el proceso de calibración.



**Ilustración 18. Sistema de visión estéreo 1 usado para los experimentos.**

Para poder llevar a cabo el diseño de experimentos con este sistema de visión estereoscópica se encontró que solo se puede obtener una salida por parte del sistema. Dicha salida corresponde a la profundidad de la escena, la cual es capturada en forma manual, es decir se tenía que ubicar el centro de la imagen donde se colocó el cilindro ubicado en la nube de puntos que se aprecia en Ilustración 19. Como área de oportunidad se necesita automatizar la medición de la profundidad de un objeto específico.

Es importante mencionar que el objeto usado como referencia tiene una profundidad de 92.56 cm de acuerdo a la nube de puntos seleccionada. La distancia real del objeto fue de 1.0075m de acuerdo al medidor láser del laboratorio.

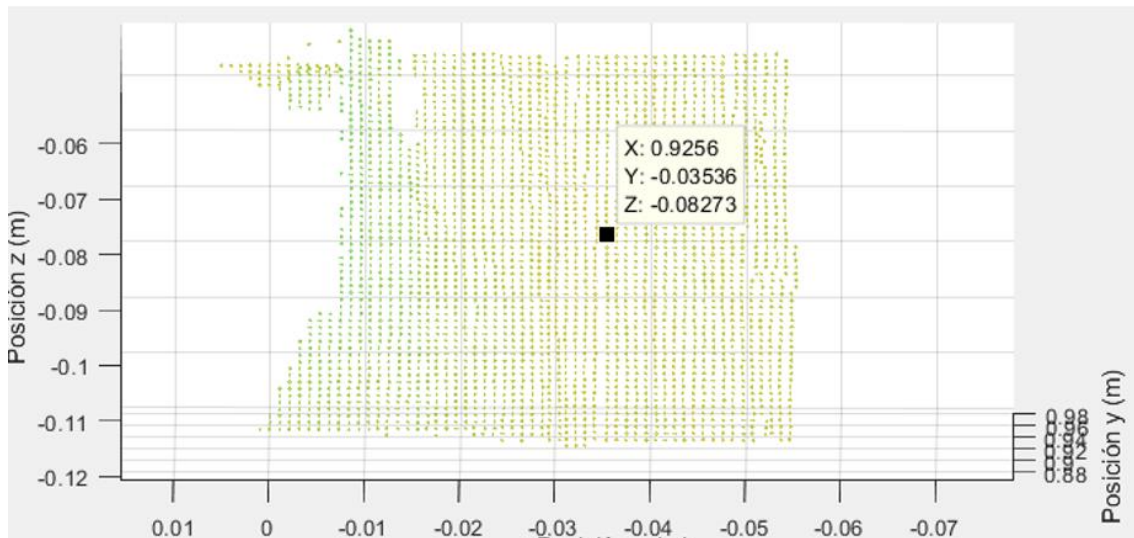


Ilustración 19. Acercamiento sobre el objeto de referencia.

En Tabla 4 se muestra 9 configuraciones distintas las cuales corresponden a 3 parámetros de entrada como la disparidad mínima, disparidad máxima y el tamaño de la ventana del algoritmo para filtrar la imagen.

El único parámetro de salida obtenido por este sistema de visión corresponde a la profundidad expresada en metros.

Tabla 4. Arreglo ortogonal de los experimentos con el sistema de visión estéreo.

No.	Disparidad Mínima	Disparidad Máxima	Tamaño de la ventana	SALIDA Profundidad (m)
1	50	200	8	0.9220
2	50	190	10	0.9265
3	50	180	12	0.9238
4	60	200	10	0.9271
5	60	190	12	0.9313
6	60	180	8	0.9226
7	70	200	12	0.9253
8	70	190	8	0.9221
9	70	180	10	0.9230

## 4.2. Resultados de los experimentos con el sistema óptico OSS

En el contexto de mediciones ópticas con el sistema OSS, se han realizado diseños de experimentos para identificar métodos que permitan mejorar su rendimiento.

En la siguiente Tabla 5 se muestra un análisis estadístico sobre el cálculo de la posición angular de una fuente de referencia la cual fue colocada a una posición angular de  $117^\circ$  con respecto de la posición del sistema OSS. La fuente fue colocada en una mesa óptica bajo condiciones de laboratorio. La idea es realizar experimentos con esta posición real para poderla comparar con las mediciones teóricas. Para estos experimentos fueron tomadas 42 muestras para realizar el análisis correspondiente. De acuerdo a los datos mostrados en esta Tabla 5 el promedio de las posiciones angulares tomadas fue de  $178.051^\circ$ . Esta media está muy alejada de la posición real de la fuente de referencia. Existe una diferencia de  $61.051^\circ$  entre la media y la posición angular real. Esto es debido a que la señal debe de ser procesada previamente para reducir el ruido eléctrico que se adquiere en la captura de la señal. Los otros datos como la desviación estándar STD, Error cuadrático medio MSE, máximos y mínimos también se ven afectados.

**Tabla 5. Análisis estadístico del rendimiento del sistema óptico de barrido sin la aplicación de filtros digitales**

Posición angular Real	Media	Desviación estándar	Error cuadrático medio	Máximo	Mínimo
117	178.051	110.2713	15676	357.0889	1.3935

En la siguiente Tabla 6 se observan los resultados de los cálculos de las 42 señales de muestra. De acuerdo a estos datos se obtuvo un promedio de  $116.9874^\circ$  de posición angular. Esta posición teórica aproxima la posición real

de la fuente de referencia. El error de la posición teórica y real es de  $0.0126^\circ$ . Estos resultados son muy superiores con respecto a la Tabla anterior debido a que los datos mostrados en esta última tabla incluyen una etapa de filtrado mediante el filtro de la mediana con 14 coeficientes. En el caso donde la restricción del tiempo de ejecución para aplicar proceso de filtrado sea un requisito de diseño, este filtro no sería una buena alternativa. Esto se debe a que el tiempo de ejecución con este filtro aplicado fue de 1.78 segundos.

**Tabla 6. Análisis estadístico del rendimiento del sistema óptico de barrido aplicando el método de umbral.**

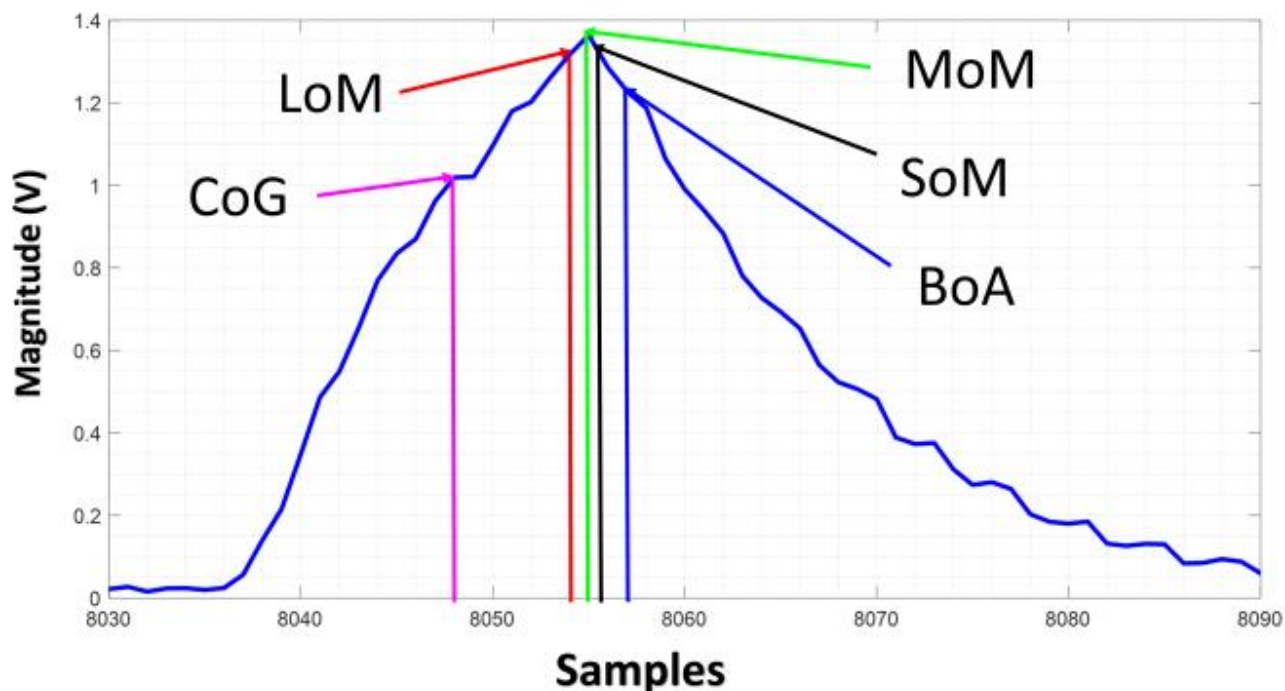
Muestras	Media	Desviación estándar	Error cuadrático medio	Máximo	Mínimo
42	116.9874	0.1847	0.0334	117.4048	116.4614

Para determinar la posición angular en el menor tiempo posible se requiere disminuir los parámetros de los filtros a utilizar. Los parámetros son el número de coeficientes del filtro, el número de orden del filtro o el tipo de filtro.

A continuación, se muestra una representación gráfica en la Ilustración 20 la cual presenta 5 métodos para determinar el máximo local de una señal gaussiana. Es importante mencionar que para poder calcular la posición angular con una precisión conveniente mediante el sistema OSS, es necesario tomar las lecturas en el punto más alto de la señal óptica. Lo que ofrecen estos métodos es evitar la etapa de filtrado calculando la posición angular de la fuente de referencia. Esto conlleva a un tiempo de ejecución menor en comparación con el método de umbrales y filtrado digital. Las líneas verticales de esta ilustración corresponden a los centroides calculados por métodos de defusificación. La línea que aparece en color magenta representa a CoG. El centroide calculado por este método se encuentra muy alejado del máximo local de la señal.

La línea en color azul representa el centroide calculado por BoA. Este método tiene un mejor rendimiento para aproximar el pico de la señal gaussiana, sin embargo, no lo suficiente como los métodos LoM, SoM y MoM. El último método MoM es el que está representado por la línea vertical verde. Es bien claro que

este método es el único que detecta el pico de la señal o máximo. Aunque LoM (línea vertical roja) y SoM (línea vertical negra) no detectan el punto máximo, sus aproximaciones son bastantes satisfactorias. Esto es debido a que la señal como se ve está contaminada con ruido eléctrico.



**Ilustración 20. Localización geométrica del máximo local mediante los métodos Cog, LoM, MoM SoM y BoA.**

En la siguiente Tabla 7 se muestran los estadísticos obtenidos aplicando el método MoM para determinar la posición angular de la fuente de referencia situada a  $117^\circ$ . La media obtenida para las 42 muestras anteriormente mencionadas corresponde a  $118.6437^\circ$  con un error de  $1.6437^\circ$  con respecto a la posición angular real. El tiempo de ejecución del algoritmo para determinar la posición angular fue de 0.047 segundos. Este tiempo es 54 veces menor en comparación con el método basado en umbrales y filtros digitales.

**Tabla 7. Análisis estadístico del rendimiento del sistema óptico de barrido aplicando el método de MoM.**

Muestras	Media	Desviación estándar	Error cuadrático medio	Máximo	Mínimo
----------	-------	---------------------	------------------------	--------	--------

---

42	118.6437	0.2011	2.7413	119.0649	118.3261
----	----------	--------	--------	----------	----------

---

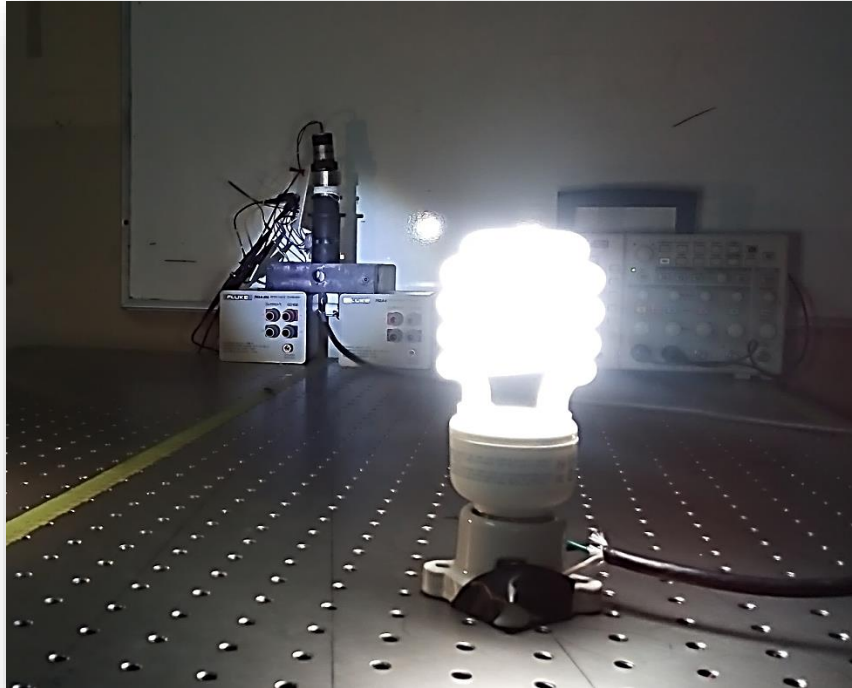
#### 4.2.1. Aplicando ANOVA de una vía al sistema OSS

A continuación, se presenta los experimentos para comparar tres métodos que sirven para calcular la posición angular de una fuente de referencia colocada en una mesa experimental. La idea principal de realizar este experimento es estudiar si los métodos basados en lógica difusa tienen un desempeño igual o mejor que al que se basa en un umbral. El método basado en umbrales es un método que requiere una etapa de filtrado para la eliminación del ruido eléctrico de la señal capturada.

En la Tabla 8 se muestran las observaciones que sirven para realizar el análisis ANOVA de un solo factor.

Los detalles para la toma de las lecturas fueron los siguientes:

1. El experimento fue llevado a cabo bajo condiciones de laboratorio en una mesa óptica experimental.
2. Se utiliza un sistema OSS pasivo para detectar una fuente de radiación.
3. La fuente luminosa fue colocada aproximadamente en la posición angular de  $117^\circ$  con respecto a la posición de la apertura que se ubica al fondo de Ilustración 21.
4. La velocidad de escaneo del sistema OSS fue de 42 muestras por segundo.



**Ilustración 21. Fuente de referencia colocado en mesa experimental.**

En Tabla 8 se muestran las 24 observaciones tomadas aleatoriamente para llevar a cabo el análisis ANOVA. La primera columna representa el método Umbral, la segunda y tercera columna corresponden a los métodos basados en lógica difusa como MoM y LoM, respectivamente.

**Tabla 8. Posición angular de los métodos Umbral, MoM y LoM (medidas en grados).**

<b>Método Umbral</b>	<b>Método MoM</b>	<b>Método LoM</b>
117.173	117.015	117.324
116.867	116.633	116.324
117.173	117.015	117.707
116.757	116.324	116.324
117.078	117.17	117.015
117.093	117.398	117.707
117.116	117.015	117.015
117.289	117.942	117.633

Estos valores seleccionados aleatoriamente representan el 20% aproximadamente de la muestra total que fue de 42 muestras por cada método.

Para establecer nuestro análisis primero se plantea que la media de cada tratamiento es igual, es decir,  $h_0 = \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$ . Con esta hipótesis se quiere analizar si los nuevos métodos ofrecen resultados similares a los obtenidos por el método de umbral. El método basado en umbrales ya ha sido ampliamente utilizado en trabajos anteriores con resultados satisfactorios. Sin embargo, el principal objetivo de la presente tesis es mejorar el desempeño del sistema OSS. Por lo tanto, la referencia de la comparación corresponde al método basado en umbrales y este análisis nos da como respuesta que si existe suficiente evidencia estadística de que las 3 medias mostradas en la Tabla 8 son iguales.

La Tabla 9 muestra el resumen del análisis de varianza para un solo factor. Donde el valor de la tabla F para un nivel de confianza del 5% fue tomado a partir de los grados de libertad del numerador fueron 2 y los números de grados del denominador corresponden a 21.

**Tabla 9. Tabla resumen del análisis estadístico realizado mediante ANOVA al cálculo de la posición angular mediante los métodos Umbral, MoM y LoM.**

Fuente de variación	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	Tabla F=0.95	Aceptación De H0
Tratamientos	2	0.023	0.011	0.058	3.467	SI
Error	21	4.127	0.197			

En la Ilustración 22 se observa el valor crítico F de 3.567 en el recuadro en color rojo. Dado que el F calculado de la Tabla 9 es de 0.058 se acepta la hipótesis  $h_0 = \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$ , es decir no existen diferencias suficientes entre los métodos analizados.

Para ubicar el F crítico en la Ilustración 22 se debe de considerar los grados de libertad tanto del numerador como el denominador, para una mejor referencia estos se identifican en los recuadros en color verde.

g.d.l	Grados de libertad del Numerador								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	161,4	199,5	215,7	224,6	230,2	234,0	236,8	238,9	240,5
2	18,513	19,000	19,164	19,247	19,296	19,330	19,353	19,371	19,385
3	10,128	9,552	9,277	9,117	9,013	8,941	8,887	8,845	8,812
4	7,709	6,944	6,591	6,388	6,256	6,163	6,094	6,041	5,999
5	6,608	5,786	5,409	5,192	5,050	4,950	4,876	4,818	4,772
6	5,987	5,143	4,757	4,534	4,387	4,284	4,207	4,147	4,099
7	5,591	4,737	4,347	4,120	3,972	3,866	3,787	3,726	3,677
8	5,318	4,459	4,066	3,838	3,687	3,581	3,500	3,438	3,388
9	5,117	4,256	3,863	3,633	3,482	3,374	3,293	3,230	3,179
10	4,965	4,103	3,708	3,478	3,326	3,217	3,135	3,072	3,020
11	4,844	3,982	3,587	3,357	3,204	3,095	3,012	2,948	2,896
12	4,747	3,885	3,490	3,259	3,106	2,996	2,913	2,849	2,796
13	4,667	3,806	3,411	3,179	3,025	2,915	2,832	2,767	2,714
14	4,600	3,739	3,344	3,112	2,958	2,848	2,764	2,699	2,646
15	4,543	3,682	3,287	3,056	2,901	2,790	2,707	2,641	2,588
16	4,494	3,634	3,239	3,007	2,852	2,741	2,657	2,591	2,538
17	4,451	3,592	3,197	2,965	2,810	2,699	2,614	2,548	2,494
18	4,414	3,555	3,160	2,928	2,773	2,661	2,577	2,510	2,456
19	4,381	3,522	3,127	2,895	2,740	2,628	2,544	2,477	2,423
20	4,351	3,493	3,098	2,866	2,711	2,599	2,514	2,447	2,393
21	4,325	3,467	3,072	2,840	2,685	2,573	2,488	2,420	2,366
22	4,301	3,443	3,049	2,817	2,661	2,549	2,464	2,397	2,342
23	4,279	3,422	3,028	2,796	2,640	2,528	2,442	2,375	2,320
24	4,260	3,403	3,009	2,776	2,621	2,508	2,423	2,355	2,300
25	4,242	3,385	2,991	2,759	2,603	2,490	2,405	2,337	2,282

Ilustración 22. Valores críticos obtenidos para el análisis ANOVA de un factor.

En la siguiente Tabla 10 se muestra otros experimentos con el mismo sistema OSS y bajo las mismas condiciones, con la diferencia que, en esta ocasión se registran muestras de los tiempos de cómputo de cada uno de los métodos. La finalidad de estos experimentos es implementar el análisis mediante ANOVA de un solo factor para determinar si existe una diferencia estadística sobre el tiempo que tarda el sistema en determinar la posición angular entre los 3 métodos anteriormente mencionados.

Tabla 10. Tiempo computacional en segundos aplicando los métodos Umbral, MoM y LoM (medidas en segundos).

Método Umbral	Método MoM	Método LoM
1.845621	0.302788	0.302788
1.837238	0.328616	0.328616
1.853895	0.301784	0.301784
1.84189	0.317174	0.317174
1.839552	0.298343	0.298343
1.935492	0.315601	0.315601
2.114085	0.313437	0.313437
1.8728	0.320029	0.320029

En la Tabla 11 se presenta el resumen ANOVA en donde se considera el costo computacional de cada método. Se alcanza a apreciar que el estadístico calculado F cuyo valor es de 2153.075 es muy alto en comparación a su significación obtenido de 3.467 de la tabla de valores críticos, esto revela que existen diferencias significativas como para determinar que los tiempos que tarda el sistema OSS con el método basado en umbrales para calcular la posición angular demandan mayor costo computacional en comparación con los métodos MoM y LoM.

**Tabla 11. Tabla resumen del análisis estadístico realizado mediante ANOVA para los tiempos de cómputo entre los métodos Umbral, MoM y LoM.**

Fuente de variación	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	Tabla F=0.95	Aceptación De H0
Tratamientos	2	13.32003	6.66002	2153.075	3.467	NO
Error	21	0.06496	0.00309			

### 4.3. Resultados de los experimentos aplicando filtros digitales con el sistema óptico OSS

En la Tabla 12 se muestran los resultados de los experimentos que se llevaron a cabo para aplicar filtros digitales a las señales capturadas por el sistema OSS. La finalidad de realizar estos experimentos radica principalmente en que es posible mejorar el desempeño del sistema de visión en términos de tiempo de cómputo para determinar la posición angular de una fuente de referencia considerando la eliminación del ruido eléctrico.

Los parámetros de entrada que aquí se muestran corresponden a él tipo de filtro digital, el número de orden del filtro y la frecuencia de corte  $f_c$ . En cuanto la salida del sistema OSS se muestra el error cuadrático medio ECM, el cual corresponde al error obtenido en comparación con la posición real de una fuente luminosa

colocada en una mesa óptica experimental. La otra salida mostrada corresponde a  $T_A$  el cual muestra el tiempo que tarda el algoritmo en filtrar la señal hasta calcular el ECM de la posición angular de la fuente de referencia. Los siguientes elementos CRG1 y CRG2 corresponden a los coeficientes relacionales gris y GRG corresponde al grado relacional gris. Finalmente, el rango muestra cual es la configuración que cumple con los requerimientos de minimizar el error y el tiempo de cómputo para determinar la posición angular.

**Tabla 12. Arreglo ortogonal para análisis relacional gray aplicado para diferentes tipos de filtros y configuraciones que mejoran el rendimiento del sistema de barrido.**

Tipo	Orden	$f_c$ (Hz)	ECM (°)	TA (s)	CRG1	CRG2	GRG	Rango
Butterworth	1	2000	2.69	0.085	1	0.799	0.9	1
Butterworth	2	1500	9.61	0.082	0.65	1	0.825	3
Butterworth	3	1200	28.46	0.087	0.333	0.713	0.523	7
Elíptico	1	1200	4.83	0.091	0.858	0.568	0.713	4
Elíptico	2	2000	6.03	0.107	0.795	0.333	0.564	6
Elíptico	3	1500	28.22	0.103	0.335	0.377	0.356	9
Chebyshev 1	1	1500	3.47	0.086	0.943	0.736	0.839	2
Chebyshev 1	2	1200	17.33	0.094	0.468	0.518	0.493	8
Chebyshev 1	3	2000	15.69	0.086	0.498	0.741	0.619	5

En este caso la configuración que mejor se adecua a los requerimientos de diseño corresponden a la implementación de un filtro digital Butterworth de orden 1 y con una frecuencia de corte de 2000Hz.

#### 4.4. Resultados de los experimentos con sistemas de visión estereoscópica.

Para efectuar los experimentos se tomaron como referencia 2 sistemas de visión con las características diferentes modelo de cámara, longitud focal, fuente y parámetros de salida.

El primer sistema no usa fuente de radiación para fijar objetivos, solo utiliza la luz natural para realizar el mapa de disparidades de una escena. Para capturar la profundidad se tiene que tomar en forma manual en la nube de puntos. Con el sistema de visión 2 es posible usar un láser para fijar los objetos de referencia para determinar la profundidad a partir de la distancia entre las cámaras, así

como aplicar distintos tipos de filtros para imágenes. En Ilustración 23, se puede apreciar los dos tipos de cámaras usados para los 2 sistemas de visión estéreo que fueron utilizados para los experimentos en esta investigación.



**Ilustración 23. Características técnicas de las cámaras utilizadas para el cálculo de la profundidad.**

#### 4.4.1. Sistema de visión 2

En la siguiente Ilustración 24 se muestra cómo se llevaron a cabo los experimentos con el sistema de visión número 2. La imagen de la izquierda muestra las dos cámaras separadas a una distancia 10.5 cm entre sí.

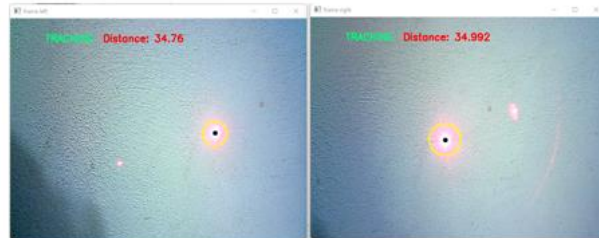
Este sistema de visión estéreo cuenta con un láser para fijar un objetivo con el propósito de que este pueda ser detectado por las cámaras y así calcular la profundidad. En esta ocasión el objetivo se fija sobre la pared y para fines experimentales la distancia real entre la pared y el sistema de visión estéreo fue de 35 cm.

La imagen de la derecha muestra en el centro la mancha del láser encerrada en círculo amarillo sobre la pared. Los experimentos que se realizaron consistieron en aplicar diferentes tipos de filtros y medir la diferencia absoluta entre el valor real y el valor calculado por el sistema. Además, también se toma en cuenta el tiempo en que tarda el algoritmo para filtrar la imagen.

## Experimentos con el Sistema de visión 2



Sistema de Visión Estéreo



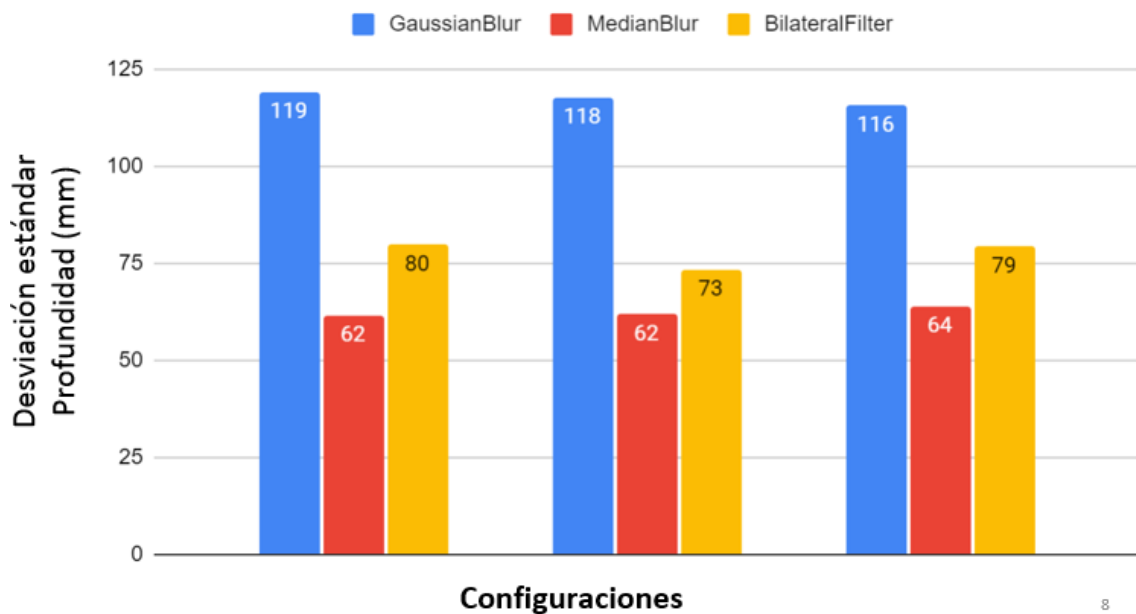
Cámara Izquierda Cámara Derecha

Ilustración 24. Sistema de visión estero con cámaras WDM

A continuación, se muestran los resultados de los experimentos con el sistema de visión 2. En esta ocasión se analizan distintos tipos de funciones para el filtrado de las imágenes en términos de variabilidad para calcular la profundidad.

En el primer gráfico en color azul se muestra el filtro gaussiano, el segundo filtro que se identifica en color rojo corresponde al filtro de la mediana y finalmente el tercer filtro en color naranja se muestra el filtro Bilateral.

Para este experimento se tomaron 200 muestras de la medición de la profundidad por cada filtro y se midió la desviación estándar la cual se muestra en este gráfico de barras. Las unidades que aquí se muestran están en milímetros, por ejemplo, el filtro gaussiano tiene una desviación estándar de 119 milímetros y el filtro de la mediana de 62 milímetros.



**Ilustración 25. Rendimiento del sistema estéreo 2 en términos de desviación estándar para medir la profundidad.**

En la siguiente Tabla 13 se muestran los resultados aplicando análisis relacional gris al sistema de visión estereoscópica.

En total se realizaron 9 configuraciones las cuales corresponden a tres factores distintos: Por ejemplo, para el factor A se tiene el filtrado de las imágenes mediante Gaussiano, el filtro de la mediana y el filtro bilateral.

El factor B indica los parámetros de entrada como el tamaño del *kernel* o matriz. El factor C usado corresponde al ángulo de visión en el plano horizontal medido en grados. Las salidas del sistema corresponden al error absoluto de la diferencia entre la distancia del sistema de visión y el objetivo expresado en centímetros. La segunda salida del sistema corresponde al tiempo medido en segundos en que tarda el algoritmo en realizar el filtrado digital y calcular la profundidad.

**Tabla 13. Arreglo ortogonal para análisis relacional gray aplicado para diferentes tipos de filtrado digital utilizando un sistema de visión estéreo.**

Configuración	Filtro	<i>kernel</i>	Angulo de visión	Error absoluto	Duración del algoritmo (seg)	CRG1	GRG2	GRG	Rango
1	Gaussiano	3	44.4	0.284202	0.011907	3.330	9.980	6.660	9
2	Gaussiano	5	44.5	0.137251	0.011378	5.860	1.200	7.930	4
3	Gaussiano	7	44.6	0.227060	0.011749	4.010	9.980	7.000	7
4	Mediana	3	44.5	0.114444	0.013606	6.640	9.940	8.290	3
5	Mediana	5	44.6	0.079965	0.014112	8.320	9.920	9.120	1
6	Mediana	7	44.4	0.057045	0.657904	1.200	3.330	6.670	8
7	Bilateral	3	44.6	0.095049	0.013785	7.500	9.920	8.710	2
8	Bilateral	5	44.4	0.134144	0.015180	5.960	9.880	7.920	5
9	Bilateral	7	44.5	0.156743	0.045564	5.320	9.040	7.180	6

## Capítulo 5. Conclusiones

En el presente trabajo uno de los objetivos fue el de realizar diversos experimentos en donde se buscará siempre mejorar el desempeño de los sistemas TVS y el sistema de visión estéreo. Como conclusiones se pueden enumerar diferentes hallazgos sobre todo para cada configuración o experimento realizado.

*Conclusión 1:* Para el análisis ANOVA en la medición de la posición angular basados los métodos Umbral, método de la media máxima y el método del máximo más grande se puede concluir que no existen diferencias estadísticas suficientes como para determinar alguna diferencia entre las muestras observadas. Esto sugiere que los resultados de los métodos de defusificación y el método de umbral son similares. Esto significa que ahora se amplían las alternativas para determinar la posición angular con métodos basados en lógica difusa. Dado que los métodos de defusificación fueron implementados durante el desarrollo de este trabajo de investigación, es importante señalar la potencialidad de los métodos de defusificación aplicados a los sistemas de barrido. La ventaja más relevante de los métodos de lógica difusa consiste en que estos no requieren una etapa de filtrado, por lo cual estos resultan atractivos para el diseñador.

*Conclusión 2:* Para el análisis relacional gray y Taguchi se pudo observar que los filtros Butterworth presentaron los mejores resultados. La configuración que mejor rendimiento ofrece al menor tiempo computacional corresponde al de un filtro tipo Butterworth de primer orden con una frecuencia de corte de 2000Hz. Lo notable es que se encontró un diseño de primer orden y que exige menos costo computacional al necesitar menos parámetros para su diseño.

*Conclusión 3:* Los métodos basados en lógica difusa ofrecen en término de tiempo de ejecución hasta 54 veces menor que los métodos que utilizan algoritmos de ML y métodos basados en filtros digitales. Cabe recordar que para

poder utilizar el método de umbrales es indispensable el suavizado de la señal; sin embargo, el costo computacional se ve afectado en comparación de los métodos de defusificación.

*Conclusión 4:* Para concluir los experimentos mediante el sistema de visión estéreo 2, es importante mencionar que en esta configuración el filtro *MedianBlur* registró el mejor rendimiento del sistema para la determinación de la profundidad. Esto fue determinado a partir de la desviación estándar de 66mm de un conjunto de 200 muestras. La mejor configuración es utilizando este filtro de la mediana con un *kernel* de 5 y ángulo de visión de 44.6. En esta configuración se considera reducir el error absoluto de las mediciones de la profundidad y también realizar dichos cálculos en el menor tiempo posible.

*Recomendaciones:* Para lograr el acoplamiento entre los sistemas de visión es importante eliminar todas las posibles fuentes de ruido o factores que afectan llevar a cabo la integración del sistema láser con el sistema de visión estéreo. Uno de los factores encontrados durante la experimentación fue relacionado con la alineación de los dispositivos como las lentes y el láser usado. El acondicionamiento de la señal también es uno de los factores que influyen en el rendimiento de la señal. Por ejemplo, la señal Gaussiana capturada resultó estar mezclada con pulsos digitales. El sistema láser cuenta con un circuito opto interruptor que sirve para establecer la referencia angular del motor que captura la señal Gaussiana. Este circuito envía un pulso digital cada vuelta completa del motor. En trabajos anteriores referente a este problema ya se ha presentado de la misma forma. Lo que se ha sugerido para minimizar estos factores son: 1) elaborar el circuito opto-interruptor en una placa, 2) separar el circuito que alimenta al motor, sobre todo si dicho circuito controla la velocidad y 3) evitar en medida de lo posible el uso de protoboard (tabla experimental o placa de pruebas). Estas recomendaciones aplican para el sistema de visión 1.

## Referencias

- Alejandro Ruiz González, C. W. (2017). Metodología de Superficie de Respuesta como alternativa en la búsqueda de condiciones óptimas. *Anuario*, 15(1), 1-31.
- Amanda Acosta Solares, O. P. (2021). Potencialidades De La Metodología De Superficie Respuesta en La Optimización Experimental en La Industria Química Y Alimentaria. *Centro Azúcar*, 48(4), 123–138.
- ams OSRAM Group. (12 de Nov de 2021). *ams OSRAM Group*. Obtenido de <https://ams.com/en/stereovision>
- Box, G. E. (1951). On the experimental attainment of optimum conditions. *Journal of the Royal Statistical Society*, 13(1), 1-45.
- Castillo, R. H. (2013). Procesamiento Digital de Imágenes Empleando Filtros Espaciales. *Décima Segunda Conferencia Iberoamericana en Sistemas, Cibernética e Informática: CИСCI 2013*.
- Eldin, A. B. (2011). General introduction to design of experiments (DOE). *Wide spectra of quality control*, 2, 21-26.

- Fu, B.-R. a.-W.-H.-C. (2014). Statistical analysis of patent data relating to the organic Rankine cycle. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 986-994.
- JMP. (07 de Nov de 2021). Obtenido de [https://www.jmp.com/en\\_au/statistics-knowledge-portal/what-is-design-of-experiments.html](https://www.jmp.com/en_au/statistics-knowledge-portal/what-is-design-of-experiments.html)
- Kleppmann, W. (2003). Taschenbuch Versuchsplanung. *Produkte und Prozesse optimieren*, 7, 12.
- Kumar, R. a. (2019). Supplier selection of an Indian heavy locomotive manufacturer: An integrated approach using Taguchi loss function, TOPSIS, and AHP. *IIMB Management Review*, 78-90.
- López, J. C. (2008). Impacto de la Metrología en los Procesos de la Industria de Semiconductores. *In Simposio de Metrología Santiago de Querétaro* (pág. 25). Querétaro: Centro Nacional de Metrología.
- Marzbanrad, J. M. (2013). Optimization of a passive vehicle suspension system for ride comfort enhancement with different speeds based on design of experiment method (DOE) method. *Journal of Mechanical Engineering Research*, 5(3), 50-59.
- Medina Naranjo, J. F. (2012). Control de un brazo robótico para clasificar objetos sólidos con formas definidas utilizando visión estereoscópica. *Tesis de Licenciatura*. Quito, Ecuador.
- Minitab. (08 de Feb de 2022). *Soporte de Minitab 18*. Obtenido de <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/supporting-topics/response-surface-designs/response-surface-central-composite-and-box-behnken-designs/>
- Montgomery, D. C. (2005). *Diseño y análisis de experimentos*. Limusa Wiley.
- Pablo, T. R. (2008). Metodología para el Diseño de Experimentos(Doe) en la Industria. *Tesis Doctoral*. , España: Universidad deNavarra.
- Potsaid, B. M., Taranto, J. J., & Cable, A. E. (2013). *Estados Unidos Patente nº US 9.200,887 B2*.

- Quintella, C. M. (2011). CO2 capture technologies: An overview with technology assessment based on patents and articles. *Energy Procedia*, 4, 2050-2057. doi:<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.02.087>
- Ramírez Giraldo, J. C., Fletcher, J. J., & Mccollough, C. H. (2010). Reducción del ruido en imágenes de tomografía computarizada usando un filtro bilateral anisotrópico. *Revista Ingeniería Biomédica*, 4(7), 55-62.
- Revelo-Luna, D. A.-M. (2012). Reconstrucción 3D de escenas mediante un sistema de visión estéreo basado en extracción de características y desarrollado en openCV. *Ingeniería y Universidad*, 16(2), 485-500.
- Roy, R. K. (1990). *A Primer on the Taguchi Method*. Dearborn, Michigan: Society of Manufacturing Engineers.
- Salazar, J. C., & Zapata, A. B. (2009). Análisis y diseño de experimentos aplicados a estudios de simulación. *Dyna*, 249-257.
- Schmid, W. A. (2000). Guía para estimar la incertidumbre de la medición. *CENAM, El Marquez, Qro., Mexico*, 1-27.
- Sifeng Liu, J. Y.-L. (2010). *Advances in Grey Systems Research*. Berlin Heidelberg: Springer Science & Business Media.
- Vásquez, J. D. (2020). Diseño de un software para la generación de certificados de calibración en metrología térmica. *Scientia et Technica*, 77-85.

# Anexos

En esta sección es presentada trabajos de investigación realizados durante el periodo que comprendió el presente trabajo.

## Esta será la función a utilizar generar los arreglos ortogonales aplicando Taguchi

```
function [Ta] = TaguchiArray(Q , N)
% Q is the number of the levels;
% N is the number of the factors (the columns);
% M = Q^J is the number of rows of the Taguchi array, where J meets the euqation N= Q^(J-1) - 1)/(Q-1);
% The Taguchi array can be denoted as L_M_(Q^N) = Ta(M*N).
if ( nargin==0)
    Q=3;
    N=4;
end
%%
J = floor(log(N*(Q-1)+1)/log(Q)); % N = (Q^J - 1)/(Q-1);
if(N ~= ((Q^J - 1)/(Q-1))) % To find the suitable J meeting the equation above;
    J=J+1;
end
Ta = [];
for k = 1:J
    j = (Q^(k-1) - 1)/(Q-1) + 1;
    for i= 1 : Q^j
        Ta(i,j) = mod(floor((i-1)/Q^(J-k)) ,Q);
    end
end
% Step 2:Construct the nonbasic columnsas follows
for k=2 :J
    j = (Q^(k-1) - 1)/(Q-1) + 1;
    for s = 1 : j-1
        for t = 1 : Q-1
            Ta(:,j+(s-1)*(Q-1)+t) = mod(Ta(:,s)*t+Ta(:,j),Q);
        end
    end
end
%Step 3:Incrementby a(i,j) by one for all, i.e., 1<=i<=M, 1<=j<=M
Ta = Ta+1;
Ta = Ta(:,1:N);
end
```

Por ejemplo, para generar el arreglo ortogonal para 3 niveles y 3 factores la función devuelve las siguientes configuraciones. Donde, las columnas corresponden a los factores y los renglones a los niveles.

```

Command Window

>> [Ta] = TaguchiArray(3 , 3)

Ta =

     1     1     1
     1     2     2
     1     3     3
     2     1     2
     2     2     3
     2     3     1
     3     1     3
     3     2     1
     3     3     2

```

## Programa de cómputo referente al método de análisis relacional gris.

```

function data = GRG_rank(X,metodo)
maxX1=max(X(:,1));minX1=min(X(:,1));
maxX2=max(X(:,2));minX2=min(X(:,2));
%Paso 1 normalización de X1 y X2
switch metodo
case 'smaller'
X1_norm = (maxX1-X(:,1))/(maxX1-minX1); X2_norm = (maxX2-
X(:,2))/(maxX2-minX2); case 'higher'
X1_norm = (X(:,1)-minX1)/(maxX1-minX1); X2_norm = (X(:,2)-
minX2)/(maxX2-minX2); otherwise
disp('Favor de introducir método de normalización'); end

%Paso 2, cálculo de la desviación de la secuencia Delta01=max(X1_norm)-
X1_norm; Delta01=round(Delta01,3); Delta02=max(X2_norm)-X2_norm;
Delta02=round(Delta02,3);

%Paso 3 cálculo del Grey Relational
Coefficient Delta01_min=min(Delta01); Delta01_max=max(Delta01);
Z=0.5;
GRC_1=(Delta01_min+Z*Delta01_max)/(Delta01+Z*Delta01_max);
GRC_1=round(GRC_1,3);%Coeficiente Relacional Gray 1 (Output 1)
GRC_2=(Delta01_min+Z*Delta01_max)/(Delta02+Z*Delta01_max);
GRC_2=round(GRC_2,3);%Coeficiente Relacional Gray 2 (Output 2) %Paso 4 cálculo
del Grey Relation Grade
GRG=(GRC_1+GRC_2)/2;
GRG=round(GRG,3);
[~,p] = sort(GRG,'descend');
r = 1:length(GRG);
r(p) = r;
data=[GRC_1 GRC_2 GRG r'];
end

```

# **Programa de Cómputo para Determinar la Posición Angular de un Sistema de Barrido Mediante el Proceso de Defusificación de Lógica Difusa.**

Wendy García-González, Oleg Sergiyenko, Wendy Flores Fuentes, Jesús Elías Miranda Vega, Julio Cesar Rodríguez Quiñonez y Lars Lindner.

## **Introducción**

En el presente programa de cómputo se describe la utilidad para la determinación de las coordenadas polares de un sistema óptico de barrido (OSS, de sus siglas en inglés). Esta tarea es realizada a partir de la detección de la radiación que es emitida por una fuente de referencia. Luego, el sistema puede calcular la posición de la fuente de referencia ósea sus coordenadas. Con estas señales es posible realizar las operaciones sin la necesidad de aplicar una etapa previa de filtrado digital. El programa se basa en técnicas de inteligencia artificial que permite dar una aproximación del centro energético el cual es utilizado para determinar las coordenadas antes mencionadas.

El sistema OSS es un dispositivo integrado principalmente por la estructura mecánica, sensores ópticos y dispositivos ópticos. La estructura mecánica permite al sistema OSS mantener principalmente a elementos como motor de corriente directa y los elementos que soportan a los dispositivos ópticos.

Los sensores ópticos permiten captar la radiación luminosa para convertirlas a corriente eléctrica. Además del sensor para capturar la fuente de radiación también es utilizado un foto-interruptor el cual es utilizado para enviar un pulso por cada vuelta del motor de corriente directa. Este ultimo elemento, detecta cada vuelta

completa mediante una muesca que tiene el disco giratorio. Es importante mencionar que dicho disco es montado en el eje del motor.

Los dispositivos ópticos del sistema OSS corresponden a lentes biconvexas que sirven para enfocar la señal óptica hacia el sensor óptico de la fuente de radiación. El siguiente elemento óptico corresponde a un espejo con corte a 45 grados. Este elemento refleja la radiación emitida por una fuente hacia las lentes biconvexas.

## Descripción del Programa de Cómputo

La siguiente función *denoise\_pulse.m*, es utilizado para suavizar los bordes de los pulsos que envía el foto-interruptor cada vuelta completa.

Los parámetros necesarios para esta función corresponden a *data,lim\_inf* , que corresponde a limite inferior del pulso digital seleccionado. El siguiente *data,lim\_sup* corresponde al límite superior para depurar el pulso digital. Es importante señalar que estos parámetros no deben de exceder los limites de la señal a suavizar.

El siguiente script llamado *seg\_sign.m* , es utilizado para segmentar cada señal por cada pulso o vuelta completa del motor.

```
function squareperfect4 = denoise_pulse(data,lim_inf,lim_sup)

    squareperfect4 = data; % se almacena el dato en esta variable.
    for i=1:length(squareperfect4)
        if squareperfect4(i) < lim_sup %se limpia apartir de este limite.
            squareperfect4(i)=squareperfect4(i);
        else
            squareperfect4(i) = max(data);
        end
    end

    for i=1:length(squareperfect4)
        if squareperfect4(i) < lim_inf %se limpia apartir de este limite.
            squareperfect4(i) = 0;
        else
            squareperfect4(i) = squareperfect4(i);
        end
    end
end
```

```

function rz = seq_sign(data1,data2,minpeak)

%ciclo for para tratamiento de la señal del fotointerruptor
squareperfect4=data2;
for i=1:length(squareperfect4)
    if squareperfect4(i)<0.9
        squareperfect4(i)=squareperfect4(i);
    else
        squareperfect4(i)=max(data1);
    end
end

for i=1:length(squareperfect4)
    if squareperfect4(i)<0.5
        squareperfect4(i)=squareperfect4(i);
    else
        squareperfect4(i)=max(data1);
    end
end

datalogged=data1;

[PKS,LOCS,W,P] = findpeaks(squareperfect4(:,1),'minpeakheight',minpeak);

k=[0];
%PARA SABER LA LONGITUD DE LAS LOCACIONES DE LOS PULSOS DE SUBIDA DEL%VECTOR LOCS.
for i=1:length(LOCS)-1
    leng=length(datalogged(LOCS(i):LOCS(i+1),end)');
    k(i)=leng ;
end
r=[];
rz=[];

for i=1:length(LOCS)-1;
    temp=datalogged(LOCS(i):LOCS(i+1),end)';
    if length(temp)< max(k)
        temp = [temp zeros(1,max(k)-length(temp))];
    end
    rz = vertcat(temp,rz);
end
end

```

El siguiente script *desfaseaper\_deff.m* recibe como parámetros de entrada las señales *data2* y *data1*, los cuales corresponden a los pulsos y la fuente de referencia, respectivamente. El parámetro *minpeak* corresponde al pico de referencia para que se realice la segmentación de las señales.

En este código se pueden elegir 5 tipos de técnicas para calcular el centro energético de la señal capturada. Por ejemplo, *som* corresponde (por sus siglas en inglés *smallest of maximum method*), *lom* corresponde (de sus siglas en inglés *largest of maximum method*), *mom* (de sus siglas en inglés *mean of maximum method*), *centroid* (de sus siglas en inglés *centroid of area method*), *bisector* (de sus siglas en inglés *bisector of area method*). El centro energético es calculado en grados y esta toma como referencia la duración entre el primer pulso y segundo del fotointerruptor. Es claro, que la duración de dos pulsos corresponde a una vuelta completa del motor. Por lo tanto, a posición angular de la fuente de referencia

siempre estará entre estos dos pulsos y a partir de esto puede calcularse sus coordenadas.

```
function Pulpersher = desfaseaper_defff(data2,data1,tipo,minpeak)

    rz = seg_sign(data2,data1,minpeak);%data2 es el pulso & data1 es la señal
    for i=1:min(size(rz))

        switch tipo
            case 'som'
                xCentroid = defuzz(1:length(rz(i,:)),rz(i,:), 'som');
            case 'lom'
                xCentroid = defuzz(1:length(rz(i,:)),rz(i,:), 'lom');
            case 'mom'
                xCentroid = defuzz(1:length(rz(i,:)),rz(i,:), 'mom');
            case 'centroid'
                xCentroid = defuzz(1:length(rz(i,:)),rz(i,:), 'centroid');
            case 'bisector'
                xCentroid = defuzz(1:length(rz(i,:)),rz(i,:), 'bisector');
        end
        Pulpersher(i) = (xCentroid*360)/length(rz(i,:));
    end
end
```

## Ejecución y validación del Programa de Computo

En esta sección se realizará la ejecución y validación del programa de cómputo, esta misma está integrada por la adquisición de la base de datos.

### Adquisición de la base de datos

Para hacer la validación del programa de computo se va a realizar las pruebas con una base de datos que corresponde a señales capturadas por una fotoresistencia LDR (light dependen resistor). La base de datos corresponde a *fotoresistencia.mat*,

la cual comprende de *data1* y *data2*. La longitud de cada vector corresponde a 40,000 muestras las cuales fueron tomadas en un tiempo de un segundo. En la Figura 1 se muestra una ventana de tiempo que relaciona los dos pulsos (en azul) de la vuelta completa del motor del sistema OSS y la señal de la fuente de referencia (rojo).

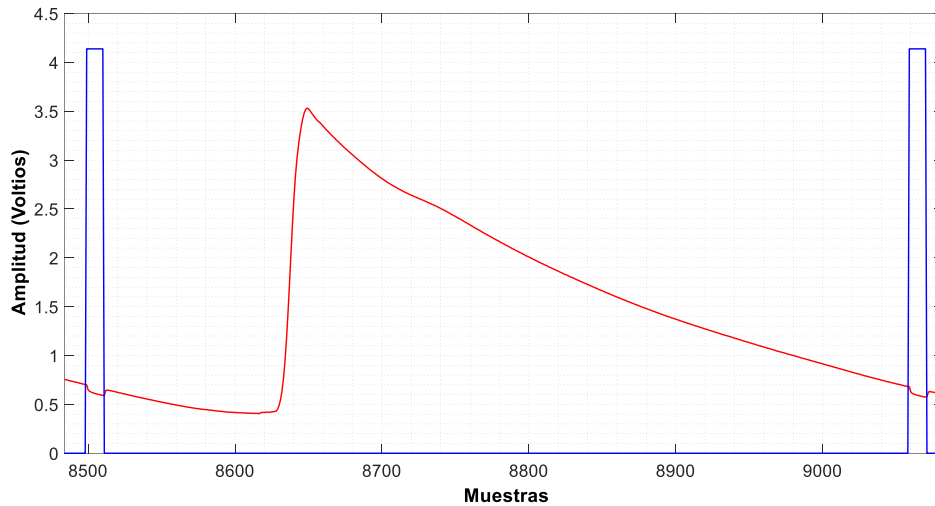


Figura 1. Pulsos del motor y señal capturada de la fuente de referencia por el sensor LDR.

La Figura 2, describe la localización del centro energético aplicando técnicas basadas en inteligencia artificial

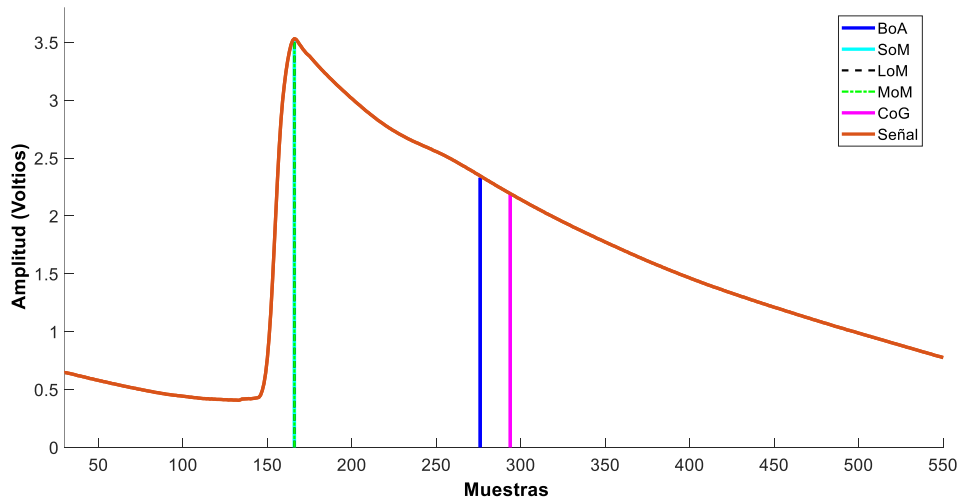


Figura 2. Centro energético para una señal capturada con una LDR sin etapa de filtrado digital.

El siguiente script genera las Figuras 1 y 2. Cabe señalar que en *theta\_1* hasta *theta\_4*, se guardan la posición angular correspondiente para cada técnica aplicada.

Cada uno de estos vectores tiene 70 mediciones de las posiciones angulares calculadas en un vector renglón.

```

clear;clc;close
load('C:\Program Files\MATLAB\R2017b\bin\MATLAB_FILES\fotoresistencia.mat',
'datal','data2')
data2=denoise_pulse(data2,0.5,2);

for i=1:1
    theta_0 = desfaseaper_deff(data2,data1,'bisector',0.8);
    mean_theta(i) = mean(theta_0); X = 96*ones(1,length(theta_0)); errx =
immse(theta_0,X);
    theta_1 = desfaseaper_deff(data2,data1,'som',0.8); %%
    theta_2 = desfaseaper_deff(data2,data1,'lom',0.8); %%
    theta_3 = desfaseaper_deff(data2,data1,'mom',0.8); %%
    theta_4 = desfaseaper_deff(data2,data1,'centroid',0.8);
end

figure(2)
plot(data1,'r','LineWidth',1.3);hold on;plot(data2,'b','LineWidth',1.3)
axis([8484 9082 0 4.5])
xlabel(' Muestras','FontSize',15,'FontWeight','bold','Color','black')
ylabel(' Amplitud (Voltios)','FontSize',15,'FontWeight','bold','Color','black')
ax = gca;
ax.FontSize = 16;
grid minor

figure(3)
xCentroid = defuzz(1:length(data1(8484:9082,:)),data1(8484:9082,:),'bisector');
hCentroid = line([xCentroid xCentroid],[0 2.33],'Color','b','LineWidth',3);

hold on
xCentroid = defuzz(1:length(data1(8484:9082,:)),data1(8484:9082,:),'som');
hCentroid = line([xCentroid xCentroid],[0 2.33],'Color','c','LineWidth',3);

xCentroid = defuzz(1:length(data1(8484:9082,:)),data1(8484:9082,:),'lom');
hCentroid = line([xCentroid xCentroid],[0 2.33],'Color','k','LineStyle','--','LineWidth',2);
%
xCentroid = defuzz(1:length(data1(8484:9082,:)),data1(8484:9082,:),'mom');
hCentroid = line([xCentroid xCentroid],[0 2.33],'Color','g','LineStyle','-.','LineWidth',2);

xCentroid = defuzz(1:length(data1(8484:9082,:)),data1(8484:9082,:),'centroid');
hCentroid = line([xCentroid xCentroid],[0 2.191],'Color','m','LineWidth',3);
plot(data1(8484:9082,:), 'Color',[0.8500 0.3250 0.0980],'LineWidth',3)
axis([30 550 0 3.8])
grid minor
legend({'BoA','SoM','LoM','MoM','CoG',
'Señal'},'Location','best','Orientation','vertical')
xlabel(' Muestras','FontSize',15,'FontWeight','bold','Color','black')
ylabel(' Amplitud (Voltios)','FontSize',15,'FontWeight','bold','Color','black')

ax = gca; ax.FontSize = 16;

```

Si se efectúa la media aritmética a cada uno de estos vectores que contienen los ángulos *theta* se obtiene la posición angular promedio de la fuente de referencia. La aplicabilidad de esto radica en que es posible monitorear la posición de un objeto.

## Validación del programa

A partir de aquí el diseñador determina qué tipo de técnica es conveniente aplicar para el sistema OSS. Cada uno de estos resultados se compara con la posición angular real del objeto o fuente de referencia. En el caso de este programa de cómputo la posición angular real fue de 96°. Esto significa que solo las técnicas 2,3 y 4 aproximan de una manera satisfactoria en comparación a la posición real. Los métodos relacionados que son apropiados para la señal LDR corresponden a som, lom y mom, respectivamente.

```
[mean(theta_0), mean(theta_1), mean(theta_2), mean(theta_3), mean(theta_4)]  
ans =  
166.7219  96.6436  96.6436  96.6436  177.9392
```

# CERTIFICADO

## Registro Público del Derecho de Autor

Para los efectos de los artículos 13, 162, 163 fracción I, 164 fracción I, y demás relativos de la Ley Federal del Derecho de Autor, se hace constar que la **OBRA** cuyas especificaciones aparecen a continuación, ha quedado inscrita en el Registro Público del Derecho de Autor, con los siguientes datos:

**AUTORES:** FLORES FUENTES WENDY  
GARCIA GONZALEZ WENDY CITLALY  
LINDNER LARS  
MIRANDA VEGA JESUS ELIAS  
RODRIGUEZ QUIÑONEZ JULIO CESAR  
SERGIYENKO OLEG

**TÍTULO:** PROGRAMA DE COMPUTO PARA DISEÑO DE EXPERIMENTOS MEDIANTE ANALISIS RELACIONAL GRIS

**RAMA:** PROGRAMAS DE COMPUTACION

**TITULAR:** UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA (CON FUNDAMENTO EN EL ARTICULO 83 DE LA L.F.D.A.)

Con fundamento en lo establecido por el artículo 168 de la Ley Federal del Derecho de Autor, las inscripciones en el registro establecen la presunción de ser ciertos los hechos y actos que en ellas consten, salvo prueba en contrario. Toda inscripción deja a salvo los derechos de terceros. Si surge controversia, los efectos de la inscripción quedarán suspendidos en tanto se pronuncie resolución firme por autoridad competente.

Con fundamento en los artículos 2, 208, 209 fracción III y 211 de la Ley Federal del Derecho de Autor; artículos 64, 103 fracción IV y 104 del Reglamento de la Ley Federal del Derecho de Autor; y artículos 1, 3 fracción I, 4, 8 fracción I y 9 del Reglamento Interior de Instituto Nacional del Derecho de Autor, se expide el presente certificado.

**Número de Registro: 03-2022-012512185900-01**

Ciudad de México, a 26 de enero de 2022

**EL DIRECTOR DEL REGISTRO PÚBLICO DEL DERECHO DE AUTOR**

JESÚS PARETS GÓMEZ



**CULTURA**  
SECRETARÍA DE CULTURA



**INDAUTOR**  
INSTITUTO NACIONAL DEL DERECHO DE AUTOR

# CERTIFICADO

## Registro Público del Derecho de Autor

Para los efectos de los artículos 13, 162, 163 fracción I, 164 fracción I, y demás relativos de la Ley Federal del Derecho de Autor, se hace constar que la **OBRA** cuyas especificaciones aparecen a continuación, ha quedado inscrita en el Registro Público del Derecho de Autor, con los siguientes datos:

**AUTORES:** FLORES FUENTES WENDY  
GARCÍA GONZÁLEZ WENDY CITLALY  
LINDER LARS  
MIRANDA VEGA JESÚS ELÍAS  
RODRÍGUEZ QUIÑÓNEZ JULIO CÉSAR  
SERGIYENKO OLEG

**TÍTULO:** PROGRAMA DE CÓMPUTO PARA DETERMINAR LA POSICIÓN ANGULAR DE UN SISTEMA DE BARRIDO MEDIANTE EL PROCESO DE DEFUSIFICACIÓN DE LÓGICA DIFUSA.

**RAMA:** PROGRAMAS DE COMPUTACION

**TITULAR:** UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA (CON FUNDAMENTO EN EL ARTÍCULO 83 DE LA L.F.D.A.)

Con fundamento en lo establecido por el artículo 168 de la Ley Federal del Derecho de Autor, las inscripciones en el registro establecen la presunción de ser ciertos los hechos y actos que en ellas consten, salvo prueba en contrario. Toda inscripción deja a salvo los derechos de terceros. Si surge controversia, los efectos de la inscripción quedarán suspendidos en tanto se pronuncie resolución firme por autoridad competente.

Con fundamento en los artículos 2, 208, 209 fracción III y 211 de la Ley Federal del Derecho de Autor; artículos 64, 103 fracción IV y 104 del Reglamento de la Ley Federal del Derecho de Autor; y artículos 1, 3 fracción I, 4, 8 fracción I y 9 del Reglamento Interior de Instituto Nacional del Derecho de Autor, se expide el presente certificado.

**Número de Registro: 03-2021-060412075700-01**

Ciudad de México, a 23 de junio de 2021

EL DIRECTOR DEL REGISTRO PÚBLICO DEL DERECHO DE AUTOR

JESUS PARETS GOMEZ



CULTURA  
SECRETARÍA DE CULTURA



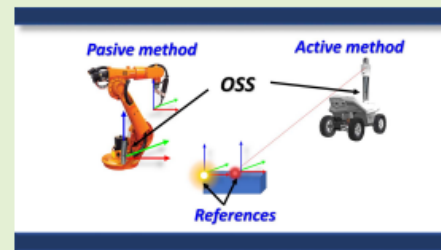
INDAUTOR  
INSTITUTO NACIONAL DEL DERECHO DE AUTOR

# Improvements of an Optical Scanning System for Indoor Localization Based on Defuzzification Methods

Jesús E. Miranda-Vega<sup>1</sup>, Arnoldo Díaz-Ramírez<sup>2</sup>, *Member, IEEE*, Oleg Sergiyenko<sup>3</sup>,  
Wendy García-González, Wendy Flores-Fuentes<sup>4</sup>, and  
Julio Cesar Rodríguez-Quirónez<sup>5</sup>, *Senior Member, IEEE*

**Abstract**—Nowadays, artificial intelligence (AI) has revolutionized the industry and made it possible to develop systems that ensure safety in human-robot collaboration. Mobile and industrial robots need a point of reference in their orientation for avoiding obstacles. Device and sensor technologies, such as acoustic sensors, Global Positioning System (GPS), light detection and ranging (LiDAR), accelerometers, and digital cameras play an important role in providing high resolution and sensitivity to solve complex problems in the industry. However, their cost and the need of applying signal processing techniques to filter their signals may not offer the required reliability for critical applications, such as indoor localization methods for industrial robots. The optical scanning systems (OSS) are devices that can be used instead at a lower cost, compared to the costs of devices previously mentioned. Nevertheless, there is still the challenge of avoiding the filtering of the signal. In this paper, a method to determine the energy center from sensors of an OSS using AI techniques is introduced. It uses defuzzification algorithms to accomplish accuracy measurements for localization and navigation tasks. The advantage of this method is that it eliminates the need of using the filtering process. One of the main contributions of this work is that the results can be used to implement an accurate and efficient indoor localization system, which can be used by an autonomous vehicle, such as industrial robots. According to the statistical analysis carried out, the minimal difference between the real position and the position estimated by the OSS was  $0.021^\circ$ .

**Index Terms**—Light-emitting diodes, optoelectronic/photonic sensors, sensor data processing.



## I. INTRODUCTION

**D**UE to the growing demand in the development of applications for the Industry 4.0 (I40) or smart factories, there is an increasing interest in the study of systems capable of performing complex tasks efficiently. Some key technologies for building I40 solutions are cyber-physical systems (CPS),

the Internet of Things (IoT), big data, network communication protocols, cloud computing, and artificial intelligence, among others [1]. Two important features of these systems are that they must respond on pre-defined time intervals and perform accurately. The schedulability analysis tools available for uniprocessor and multiprocessor real-time systems, as well as for real-time communications, allow the system designers to assure that the timing restrictions will be met. However, if the information collected by the sensors is not reliable, the system may fail.

Manuscript received February 5, 2021; revised March 21, 2021; accepted March 22, 2021. Date of publication March 24, 2021; date of current version March 14, 2022. The associate editor coordinating the review of this article and approving it for publication was Dr. Wei Dongyan. (Corresponding author: Arnoldo Díaz-Ramírez.)

Jesús E. Miranda-Vega and Arnoldo Díaz-Ramírez are with the Department of Computer Systems, Tecnológico Nacional de México/IT de Mexicali, Mexicali 21376, Mexico (e-mail: elias.miranda@itmexicali.edu.mx; adiaz@itmexicali.edu.mx).

Oleg Sergiyenko and Wendy García-González are with the Institute of Engineering, Autonomous University of Baja California, Mexicali 21100, Mexico (e-mail: srgnk@uabc.edu.mx; wendy.garcia26@uabc.edu.mx).

Wendy Flores-Fuentes and Julio Cesar Rodríguez-Quirónez are with the Faculty of Engineering, Autonomous University of Baja California, Mexicali 21100, Mexico (e-mail: flores.wendy@uabc.edu.mx; julio.rodriguez81@uabc.edu.mx).

Digital Object Identifier 10.1109/JSEN.2021.3068643

Sensors are essential components of CPS and IoT systems. They are designed to collect data from the environment, such as temperature, pressure, flow, torque, strain, images or video, to mention a few. The collected data are used to determine if an action must be taken, and to adjust the system behavior accordingly.

Artificial intelligence (AI) offers a rich set of tools to accelerate and enhance the automation process of modern factories. AI has become an integral part of everyday life, helping in the execution of complex tasks. According to [2],

1558-1748 © 2021 IEEE. Personal use is permitted, but republication/redistribution requires IEEE permission.  
See <https://www.ieee.org/publications/rights/index.html> for more information.

# Mean of Maximum Method for Optical Scanning System

Wendy Garcia-Gonzalez  
Engineering Institute  
Autonomous University of Baja California  
Mexicali, México  
wendy.garcia26@uabc.edu.mx

Oleg Sergiyenko  
Engineering Institute  
Autonomous University of Baja California  
Mexicali, México  
srgnk@uabc.edu.mx

Jesús E. Miranda-Vega  
Department of Computer Systems  
Tecnológico Nacional de México/IT de Mexicali  
Mexicali, México  
elias.miranda@itmexicali.edu.mx

Wendy Flores-Fuentes  
Faculty of Engineering  
Autonomous University of Baja California  
Mexicali, México  
flores.wendy@uabc.edu.mx

Julio César Rodríguez-Quíñonez  
Faculty of Engineering  
Autonomous University of Baja California  
Mexicali, México  
julio.rodriguez81@uabc.edu.mx

Arnoldo Diaz-Ramirez  
Department of Computer Systems  
Tecnológico Nacional de México/IT de Mexicali  
Mexicali, México  
adiaz@itmexicali.edu.mx

Alejandra Flores-Buruel  
Tecnológico Nacional de México/IT de Mexicali  
Mexicali, México  
floresb.alejandra@gmail.com

**Abstract**—This paper deals with the improvements for an optical scanning system by using a defuzzification method to detecting the energy center of the optoelectrical signal of an optical scanning system (OSS). The experiments revealed that the mean of the maximum method enhances the performance of the system without applying a digital filter. The method based on defuzzification was compared with the threshold method to validate the improvements.

**Index Terms**—Filtering, Remote sensing, Digital Signal Processing Techniques

## I. INTRODUCTION

Nowadays, when society demands high-quality products and services, there are still open issues for Machine vision (MV) to solve complex real-world problems adequately such as perception, localization, cognition and path planning, and motion control. MV covers diverse areas and empowers the manufacturing industry by reducing defects and increasing yield. This technology enhances the perception of robots by using recognition and localization methods. On the other hand, there are activities repeated, tedious and dangerous operations by humans that autonomous systems can make [1].

One of the most complex challenges for industrial robots is visual perception. In robotics, position measurements are used to identify the location and orientation of a part to pick it up.

978-1-7281-9023-5/21/\$31.00 ©2021 IEEE

Implementing an optical system for localization tasks in a real environment demands high robustness.

Path planning is one of the most researched subjects at present [2]. This problem is mainly focused on navigation, especially mobile robots. For better details For localization tasks based on mobile robots, it can review the following work [4].

There are several methods in the literature for localization and orientation. In addition, many devices improve localization applications. For instance, light detection and ranging (LiDAR) is an active laser scanning technique used for mapping structure or measuring distances by illuminating the target with a laser and measuring the time travel of the light reflected by the object under study. The Global Positioning System (GPS) is another device used for localization tasks, however, the average accuracy ranges from few meters to above 20m [3]. The LiDAR and GPS devices have disadvantages of high cost and low accuracy, respectively.

In order to create a robust optical system that ensures adequate accuracy at a low cost, it is important to pay attention to the optical scanning system (OSS). This device has been used for structural health monitoring tasks [5]. There are approximations for improving this optical system. For instance, different energy center localization methods were compared to know the best performance of them [6].