

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**Escuela de Posgrado**



**PONTIFICIA  
UNIVERSIDAD  
CATÓLICA  
DEL PERÚ**

**ELABORACIÓN DE UN SISTEMA PARA ANÁLISIS DE FALLAS  
BASADO EN PROCESAMIENTO DE IMÁGENES CAPTURADAS POR  
UN BOROSCOPIO PARA INSPECCIÓN DE TURBINAS A GAS**

**Tesis para optar al grado de Magíster en Ingeniería Mecatrónica**

**PRESENTADO POR:**

**Ing. Gerardo Manuel Ordoñez Rojas**

**ASESOR:**

**M.Sc. Ing. Carlos Enrique Villanueva Cano**

**LIMA, AGOSTO DE 2020**

## ÍNDICE

RESUMEN.....	v
ÍNDICE DE TABLAS .....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xi
INTRODUCCIÓN .....	1
Capítulo 1 .....	3
ESTADO DEL ARTE.....	3
1.1 Turbina de Gas.....	4
1.1.1. Degradación de los Sistemas de Turbinas a Gas.....	6
1.1.2. Estrategias de Mantenimiento para Turbinas a Gas (GT).....	7
1.1.3. Inspecciones Boroscópicas.....	11
1.1.4. Detección en 3D de Defectos de Álabes de Turbinas de Gas (Radiografía Digital):	14
1.1.5. Otros trabajos relacionados a la investigación .....	15
1.1.6. Soluciones Comerciales .....	16
1.1.6.1. Videoscopio Mentor Visual iQ de General Electric.....	16
1.1.6.2. Videoscopio IPLEX G Lite de Olympus.....	17
1.1.6.3. Videoscopio de medición laser SP100 de Karl Storz.....	18
1.2. Objetivos.....	21
1.2.1. Objetivo Principal .....	21
1.2.2. Objetivos Específicos.....	22

Capítulo 2.....	23
MARCO TEÓRICO.....	23
2.1. Calibración de Cámara, Método de Zhengyou Zhang.....	23
2.1.1. Calibración Fotogramétrica.....	24
2.1.2. Autocalibración.....	24
2.1.3. Ecuaciones Básicas.....	25
2.1.3.1. Notaciones.....	25
2.1.3.2. Homografía entre el plano de modelo y su imagen:.....	27
2.1.3.3. Restricciones de los parámetros intrínsecos:.....	28
2.1.3.4. Interpretación Geométrica:.....	28
2.1.4. Resolviendo la Calibración de la Cámara.....	30
2.1.5. Estimación de la Máxima Probabilidad:.....	32
2.2. Visión Computacional.....	33
2.2.1. Concepto.....	33
2.2.2. Aplicaciones.....	35
2.2.2.1. Reconocimiento óptico de caracteres (OCR por sus siglas en inglés) ....	35
2.2.2.2. Máquinas de inspección.....	35
2.2.2.3. Seguridad vehicular.....	36
2.2.3. Arquitectura de un Sistema de Procesamiento de Imágenes.....	36
2.2.4. Tipos de Fallas a Detectar en una Turbina Arriel 2E.....	37
2.2.5. Tipos de Fallas a Detectar en una Turbina PT6A.....	40

2.2.6. Etapas de la Visión por Computadora.....	42
2.2.6.1. Acondicionamiento de la imagen .....	43
2.2.6.2. Captura de imagen.....	44
2.2.6.3. Pre procesamiento de imágenes.....	44
2.2.6.4. Representación y descripción de fallas y segmentación.....	45
2.2.6.5. Reconocimiento de la falla .....	45
2.2.7. Diagramas de Flujo:.....	46
2.2.7.1. Calibración de la cámara .....	46
2.2.7.2. Medición de una falla .....	48
2.2.8. Algoritmos Seleccionados y sus Características .....	49
2.2.9. Ubicación de la Cámara para Poder Realizar la Captura de Imágenes .....	51
Capítulo 3.....	53
PROPUESTA DE DISEÑO MECATRÓNICO .....	53
3.1 Metodología de diseño.....	53
3.1.1. Lista de Exigencias.....	55
3.1.2. Estructura de Funciones .....	56
3.1.2.1. Preparación .....	56
3.1.2.2. Ejecución .....	56
3.1.2.3. Control.....	56
3.1.2.4. Fase final: .....	57
3.1.3. Concepto de Solución.....	60

3.1.4. Proyecto Preliminar.....	62
3.1.4.1. Comprensión del dominio mecánico - eléctrico .....	66
3.1.4.2. Selección de la cámara .....	67
3.1.4.3. Selección de la iluminación.....	68
Capítulo 4.....	70
RESULTADOS EXPERIMENTALES .....	70
4.1. Diseño de la toma de muestra:.....	70
4.2. Experimento con un Patrón de 1 mm .....	72
4.3. Experimento con un Patrón de 2 mm .....	75
4.4. Evaluación de la Precisión de las Mediciones.....	78
4.5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	84
4.5.1. Comparación con Otros Métodos.....	91
4.5.2. Comparación con la Realidad de Otros Equipos Comerciales.....	92
4.5.3. Propuestas Futuras.....	93
CONCLUSIONES .....	94
BIBLIOGRAFÍA .....	96
ANEXOS .....	100

## RESUMEN

En el presente trabajo se hace el uso de las herramientas del procesamiento de imágenes para poder verificar las fallas de los componentes internos de una turbina de gas. Específicamente el estudio se enfoca en uno de los problemas principales del mantenimiento de estas turbinas el cual es la medición de las fallas internas que se producen en estas máquinas complejas. En nuestro medio local no se cuentan con proveedores capaces de poder aplicar las herramientas de visión por computadora a las organizaciones que tienen turbinas de gas como uno de sus principales activos y por ende no pueden brindar la solución para que estas empresas demandan con un estándar alto de calidad a bajo costo, haciendo que el mantenimiento de las turbinas sea muy costoso y en especial en sectores como el de aviación militar y civil, energético y de transmisión de gas, los cuales son los sectores que más emplean este tipo de tecnología.

Las turbinas de gas, desde el punto de vista económico, son activos muy costosos. Según su tamaño y potencia generada, pueden llegar a tener costos en millones de dólares y mientras más continuo sea el monitoreo de su desgaste externo e interno, sea a través de inspecciones físicas directas o de parámetros medidos, mejor se podrá monitorear su deterioro y se evitarán fallas prematuras y por consiguiente se reducen sus costos de mantenimiento a largo plazo.

Con el trascurso de los años se han desarrollado diversas técnicas de mantenimiento para turbinas a gas, que han permitido incrementar su disponibilidad y confiabilidad. Una de las técnicas más importantes ha sido el monitoreo con el equipo fuera de línea u *off-line* de los componentes internos de estas turbinas, esta técnica es la boroscopia, el cual consiste de un sistema de inspección visual remota que unido a un procesamiento de imágenes brinda una herramienta potente para la detección y diagnóstico de fallas internas. Esta técnica es la más

fiable para verificar la condición física interna de las turbinas ya que anteriormente se tenían que retirar y, en caso de no tener los medios, enviar la turbina a fábrica para su inspección y reparación correspondiente.

Es por ello que en el presente trabajo se buscará diseñar un sistema de boroscopia para las turbinas a gas, el cual podrá emplearse para cumplir las funciones de inspeccionar, grabar y medir los daños internos de las turbinas a gas del mismo modo que ofrecen las soluciones comerciales, pero a un costo mucho menor. En la parte experimental de este trabajo se pone énfasis en el problema de la medición y la solución propuesta muestra que se puede obtener un error promedio de entre -0.16 a 0.028 mm para un objetivo de 5 mm., esto demuestra que la técnica obtiene resultados muy satisfactorios ya que un equipo comercial de una marca referente, que cuenta con tecnología de la medición, logra a tener un error de entre 0.025 y 0.03 mm de error para un objetivo de 5.33 mm.

**ÍNDICE DE TABLAS**

<i>Tabla 1</i> Tipos de Monitoreo en Línea y sus Indicadores .....	9
<i>Tabla 2</i> Técnicas Empleadas en Monitoreos Fuera de Línea para Turbinas a Gas .....	10
<i>Tabla 3</i> Clasificación de fallas a encontrar en una turbina de gas Arriel 2.....	39
<i>Tabla 4</i> Clasificación de fallas a encontrar en una turbina de gas PT6A.....	41
<i>Tabla 5</i> Técnicas Empleadas en Monitoreos Fuera de Línea para Turbinas a Gas .....	64
<i>Tabla 6</i> Desviación Estándar de las Medidas Obtenidas. Patrón 1 mm.....	79
<i>Tabla 7</i> Desviación Estándar Obtenidas con el Sistema Propuesto. Patrón 1 mm .....	81
<i>Tabla 8</i> Desviación Estándar Obtenidas con el Sistema Propuesto. Objetivo 1 mm.....	83
<i>Tabla 9</i> Error Promedio Total de Todos los Ángulos y su Desviación Estándar .....	85
<i>Tabla 10</i> Error Promedio Total por Patrón de Calibración.....	87
<i>Tabla 11</i> Valores Promedios Totales respecto al Valor Teórico de la Falla.....	89
<i>Tabla 12</i> Valores Promedios Totales respecto al Valor de la Falla de 5mm .....	92

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Esquema de Funcionamiento de una Turbina a Gas. ....	5
<i>Figura 2.</i> Evolución de Estrategias de Mantenimiento de Turbinas de Gas (GT).....	8
<i>Figura 3.</i> Ejemplo de Fallas en un Motor de Aeronave.....	11
<i>Figura 4.</i> Sistema para Inspección Boroscópica.....	12
<i>Figura 5.</i> Típico Videoscopio para Inspecciones Boroscópicas de una GT.....	13
<i>Figura 6.</i> Procedimiento Completo para Detectar Defectos de Álabes de Turbinas.....	15
<i>Figura 7.</i> Equipo Visual iQ Videoprobe de GE.....	17
<i>Figura 8.</i> Equipo IPLEX G Lite de Olympus.....	18
<i>Figura 9.</i> Videoscopio SP100 de Karl Storz.....	19
<i>Figura 10.</i> Entorno del programa Techno pack de Karl Storz.....	20
<i>Figura 11.</i> Coordenadas de un Punto M en el Plano de la Imagen.....	26
<i>Figura 12.</i> Corte Transversal de un Motor Arriel 2E.....	38
<i>Figura 13.</i> Fotografía de un Motor Arriel 1E.....	40
<i>Figura 14.</i> Imagen de las Partes de un Motor PT6A.....	42
<i>Figura 15.</i> Pasos de la Visión por Computadora.....	43
<i>Figura 16.</i> Diagrama de Flujo de la Calibración de la Cámara.....	47
<i>Figura 17.</i> Diagrama de Flujo de Medición de Fallas.....	48
<i>Figura 18.</i> Etapas del programa de procesamiento de imágenes.....	49
<i>Figura 19.</i> Imagen del Álabes de un Motor PT6A.....	50
<i>Figura 20.</i> Imagen Convertida a Escala de Grises de un Álabes de Turbina.....	50
<i>Figura 21.</i> Guía de Instalación Para Inspección Boroscópica en un Motor PT6A.....	51
<i>Figura 22.</i> Forma de Insertar una Sonda en un Motor para Inspeccionarlo.....	52
<i>Figura 23.</i> Proceso Generalizado de Desarrollo y Diseño de Sistemas Mecatrónicos.....	54

<i>Figura 24.</i> Lista de Exigencias para el Diseño del Equipo Boroscópico.....	55
<i>Figura 25.</i> Caja Negra del Diseño del Boroscopio. ....	57
<i>Figura 26.</i> Funcionamiento en etapas de la operación del equipo boroscópico. ....	57
<i>Figura 27.</i> Estructura de funciones del dominio de la visión por computadora. ....	58
<i>Figura 28.</i> Interacción de los Dominios de Diseño del Boroscopio .....	59
<i>Figura 29.</i> Matriz Morfológica del Dominio Mecánico-Eléctrico .....	60
<i>Figura 30.</i> Matriz Morfológica del Dominio Visión-Software .....	61
<i>Figura 31.</i> Matriz de evaluación técnica Mecánico – Eléctrico y Visión Software. ....	63
<i>Figura 32.</i> Matriz de evaluación económica Mecánico – Eléctrico y Visión Software. ....	64
<i>Figura 33.</i> Balance Técnico Económico de S1 y S2 en el dominio mecánico – eléctrico. 65	
<i>Figura 34.</i> Balance Técnico Económico de S1 y S2 en el dominio visión - software.....	65
<i>Figura 35.</i> Parámetros básicos de una cámara.....	68
<i>Figura 36.</i> Diseño de las Cuadrículas de Calibración a partir de AutoCAD.....	71
<i>Figura 37.</i> Patrón de Calibración de 1 mm. Elaboración Propia .....	72
<i>Figura 38.</i> Procedimiento de Calibración para Medición en las Veletas del Compresor... 73	
<i>Figura 39.</i> Segundo experimento con la medición (resultado 5.25 mm).....	73
<i>Figura 40.</i> Medición de la Dimensión Real del Defecto Simulado.....	74
<i>Figura 41.</i> Medición del Segundo Defecto con el Programa (Medida = 6.28 mm) .....	74
<i>Figura 32.</i> Medición de la Dimensión Real del Segundo Defecto Simulado.....	75
<i>Figura 43.</i> Patrón de Calibración de 2 mm. Elaboración Propia .....	75
<i>Figura 44.</i> Toma de Los Patrones de Calibración con un ángulo de 30°.. .....	76
<i>Figura 45.</i> Resultado de la Primera Medición con Ángulo de inclinación de 30° . ....	76
<i>Figura 46.</i> Medición de la Distancia Entre Dos Cuadrículas con un Ángulo de 30° . ....	77
<i>Figura 47.</i> Toma de Muestras Para la Calibración Con un Ángulo de incidencia de 60° ... 77	
<i>Figura 48.</i> Error por ángulo de Incidencia con Medidas con un Patrón de 1 mm.....	79

<i>Figura 49.</i> Error Promedio en las Medidas Objetivas al Emplear un Patrón de 1mm. ....	81
<i>Figura 50.</i> Error Promedio Respecto al Ángulo de Incidencia.....	83
<i>Figura 51.</i> Error Promedio por Ángulo de Incidencia.....	86
<i>Figura 52.</i> Error Promedio Obtenidas del Sistema por Ángulo de Incidencia .....	86
<i>Figura 53.</i> Error Promedio de Medidas por cada Patrón.....	88
<i>Figura 54.</i> Desviación Estándar de los Errores Promedios Totales.....	88
<i>Figura 55.</i> Valores Promedios en Todas las Mediciones. ....	90
<i>Figura 56.</i> Desviación Estándar de las Medidas Obtenidas con el Sistema. ....	90
<i>Figura 57.</i> Error Promedio de una Medición de 5.33 mm.....	91



**LISTA DE SÍMBOLOS**

AGB:	Accesory Gearbox (Caja de Accesorios de una Turbina)
ANPR:	Autonomous Number Plate Recognition
CT:	Compresor Turbine (Compresor de Turbina de Gas)
GT:	Gas Turbine o Turbina de Gasg
DVS:	Desktop Vision System (Sistema de Visión de Escritorio)
DR:	Radiografía digital
EGT:	Temperatura del gas de eyección
GE:	General Electric
LED:	Light Emitter Diode (Diodo emisor de luz)
NDT:	Prueba no Destructiva
OCR:	Optical Character Recognition (reconocimiento óptico de caracteres)
RGB:	Reduction Gearbox (Caja Reductora de una Turbina)
RGB:	Red, Green, black
USB:	Universal Serial Bus
2D:	Espacio o plano bidimensional
3D:	Espacio o plano Tridimensional
$\sigma$ :	Desviación estándar o dispersión de datos
$\bar{e}$ :	Error promedio o media aritmética del error

## INTRODUCCIÓN

Para el desarrollo del sistema de inspección boroscópica propuesta se ha dividido la estructura del presente trabajo en 4 capítulos:

En el capítulo 1 se muestra el estado de arte actual, pasando por una breve explicación del funcionamiento de las turbinas de gas, esto como introducción al funcionamiento de estas máquinas para que el lector pueda ir familiarizándose con los tipos de falla que pueden ocurrir en la parte interior de una turbina a gas y las causas principales de su desgaste. A continuación, se muestran los modelos de mantenimiento preventivo y predictivo que se han desarrollado a lo largo del tiempo a partir de la invención de este tipo de máquinas, veremos que las inspecciones visuales boroscópicas son un tipo de monitoreo fuera de línea u *off-line* que quiere decir que los datos que se puedan obtener de estas inspecciones requieren que el equipo esté paralizado y lo más probable es que la información obtenida demore tiempo en ser entregada. Se hace también una descripción de lo que significa una inspección boroscópica, así como las soluciones comerciales disponibles actualmente. Un aspecto a considerar es que, si bien existen dichas soluciones comerciales disponibles en el mercado, tales tecnologías tienen aún un costo muy elevado que incluso aún después de adquirirse cuesta mucho mantenerlas ya que un pequeño daño en los sensores ópticos y articulaciones mecánicas de este tipo de equipos conlleva a reparaciones de alto costo también. Finalmente se presenta el objetivo principal y los objetivos específicos de la presente tesis.

En el capítulo 2 se da un marco conceptual empleado para la presente tesis. Se inicia con la definición de la visión computacional, la arquitectura del modelo y los algoritmos empleados para poder realizar el procesamiento de imágenes pasando finalmente a estudiar la arquitectura

del diseño propuesto, el cual consiste principalmente en definir la manera en que se capturan las imágenes y su procesamiento para poder detectar fallas internas de la turbina. Se muestra también un método para poder calibrar la cámara del sistema que se propone en el capítulo 4, el cuál formará la base conceptual para el presente trabajo.

En el capítulo 3 se hace la propuesta del diseño mecánico para la cámara, se explica brevemente la metodología VID 2221, que es un estándar alemán para poder lograr un diseño mecatrónico; la metodología señala que se debe iniciar con la definición de la lista de exigencias, la cual será la guía para poder iniciar el diseño deseado seguido de la estructura de funciones del sistema y finalmente se llega al concepto de la solución.

Finalmente, en el capítulo 4, se muestran los resultados experimentales de la medición de defectos simulados de uno a diez milímetros con la metodología propuesta, así como ejemplos en los componentes de una turbina real. Se muestran inicialmente los resultados de los experimentos con patrones de medida de 1 mm y 2 mm. Posteriormente se resume el resultado con patrones de uno a cinco milímetros con ángulos de toma de desde 45° a 90° (con incrementos de 5°). Posteriormente se hace el análisis de los resultados obtenidos que servirán de base para la elaboración de las conclusiones del presente trabajo.

## Capítulo 1

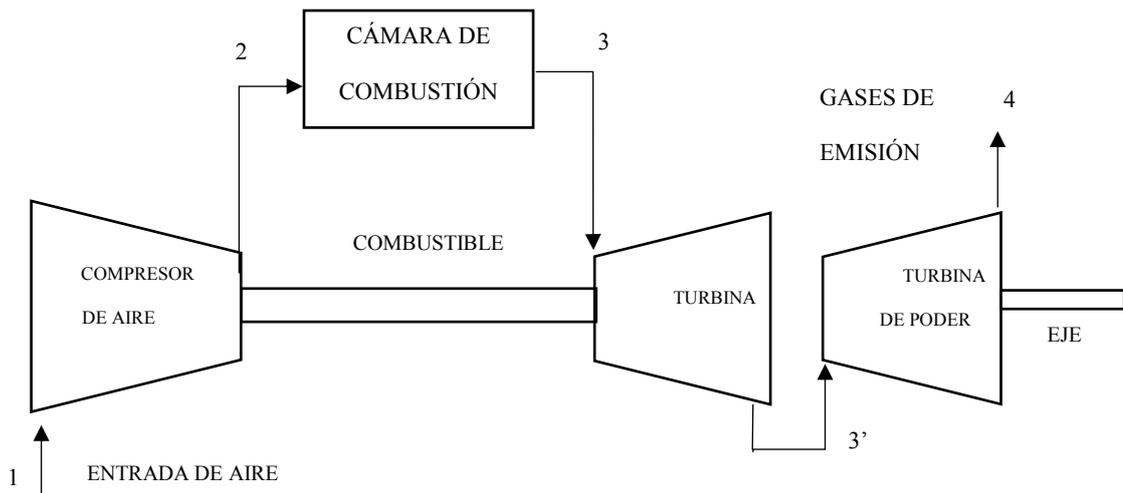
### ESTADO DEL ARTE

En el presente capítulo se mostrará, de manera general, cómo funciona una turbina a gas que se emplean en aeronaves cuyo peso básico vacío no superan los cinco mil kilogramos. Esto con la finalidad de poder conocer cómo se originan los desgastes naturales que suceden en los componentes internos de estos motores y comprender el enfoque de la solución planteada. Posteriormente los beneficios que se obtienen de este estudio podrían ampliarse para poder aplicarse en turbinas de aeronaves de mayor tamaño e incluso en turbinas empleadas en otro tipo de industrias como la de transporte de gas natural y de generación eléctrica. Luego se muestra las técnicas de mantenimiento por condición usadas para estudiar el desgaste de los componentes internos de estas turbinas y su evolución en el tiempo. Finalmente se describe los tipos de tecnología que existen en la actualidad como solución para poder hacer inspecciones boroscópicas de turbinas.

## 1.1 Turbina de Gas

Actualmente dependemos de las turbinas de gas para poder desarrollar muchas de nuestras actividades gracias a servicios que consideramos garantizados pero que en épocas anteriores no existían. Por ejemplo cuando usamos una termo eléctrica no somos conscientes de que un porcentaje de esta fue generada en una turbina a gas, otro ejemplo podría ser el gas natural que empleamos en nuestros hogares requieren de subestaciones transmisoras de gas las cuales ayudan a su transporte a diferentes niveles a través de la cordillera de Los Andes hasta las grandes ciudades y como último ejemplo podríamos considerar al transporte aéreo, cuya masificación no hubiese sido posible gracias a las turbinas de gas de gran eficiencia que emplean las aerolíneas comerciales. Según (Kulikov & Thompson, 2004) una turbina de gas puede ser considerada como uno de los sistemas de ingeniería más complejos, una simple turbina puede alcanzar a tener un total de 25,000 piezas o más, lo que trae como consecuencia un sistema muy complejo pero que actualmente logra niveles de alta confiabilidad. Para poder mantener un nivel de confiabilidad alto, que es necesario para operar equipos como aviones o helicópteros con seguridad, se aplican varias herramientas de monitoreo de condiciones y pronóstico. El análisis de vibración, desgaste, flujo y temperatura son los parámetros más importantes a monitorear en estas máquinas rotativas.

El esquema de los principales elementos de una turbina de gas es explicado por (Almasi, 2016), utilizando la figura 1 como el esquema general de funcionamiento de dicha máquina.



*Figura 1.* Esquema de Funcionamiento de una Turbina a Gas (basado en Almasi, 2016).

En base a la figura 1, se puede describir el funcionamiento de una turbina de gas de la siguiente manera: El aire ingresa a una sección de compresión en la cual sus moléculas se reducen de tamaño trayendo como consecuencia la disminución de su volumen y aumento de su presión para posteriormente pasar a una sección de combustión (1-2). En la cámara de combustión se inyecta combustible de manera uniforme junto al aire comprimido para producir la combustión (tramo 2 al 3). Los gases producto de la combustión se expanden a través de la turbina que capturan las partículas de estos gases a gran velocidad moviendo los álabes de la turbina, lo que produce que su temperatura y presión disminuyan al absorber su energía, esto se representa en el flujo a través de la turbina en el tramo (3-4) mencionado. Normalmente se conecta mecánicamente la turbina a una sección más pequeña y es ésta la que proporciona la energía mecánica solicitada.

Se podría resumir una ecuación de la termodinámica de estas turbinas con la ecuación según (Petek & Hamilton, 2005):

*Energía del eje*

$$\begin{aligned} &= \text{Energía del combustible} - \text{Potencia requerida para la compresión} \\ &\quad - \text{Energía de gases de eyección} - \text{Pérdidas mecánicas} \end{aligned}$$

Es precisamente el último elemento de esta ecuación, pérdidas mecánicas, las que se incrementan con el tiempo por el desgaste que sufren los componentes de estos mecanismos debido a las condiciones extremas a las que están sometidos.

### **1.1.1. Degradación de los Sistemas de Turbinas a Gas.**

La degradación de los sistemas de una turbina a gas se produce a lo largo del tiempo y está sujeta a tanto el uso, los agentes medioambientales o una combinación de estos. Según (Hanachi, Mechefske, Liu, Banerjee, & Chen, 2018), los componentes de una turbina de gas operan en ambientes hostiles los cuales generan mecanismos de degradación en la estructura de las partes. La degradación estructural incrementa el riesgo de fallas mecánicas y en consecuencia la descomposición del sistema. Al mismo tiempo, la degradación de los mecanismos altera la geometría y la dureza de la superficie de los perfiles aerodinámicos, lo cual afecta el desempeño de los componentes y el desempeño total del sistema. La degradación estructural sucede normalmente de manera lenta en el largo plazo y el rendimiento de las turbinas de gas no puede ser recuperado sin que se haga el reemplazo de las partes degradadas. Además de la degradación estructural, la deposición de partículas de aerosol en el sistema de filtración y en los perfiles de las superficies de sustentación altera los patrones de flujo interno que fueron diseñadas para obtener un nivel óptimo. Esta degradación, denominada degradación

de a corto plazo y según (Meher-Homji, Chaker, & Hatim, 2001) es principalmente recuperable lavando y limpiando las partes internas afectadas de la turbina.

El deterioro de las GT durante su tiempo de operación, se debe tanto los mecanismos de degradación recuperables como los no recuperables, los cuales conllevan a diversos efectos negativos como el mayor consumo de combustible, operaciones costosas y un incremento en la emisión de gases de efecto invernadero. Al mismo tiempo, de acuerdo a (Kurz, Brun, & Wollie, 2009) los mecanismos de degradación incrementan el riesgo de fallas mecánicas y cortes de servicio no planificados.

### **1.1.2. Estrategias de Mantenimiento para Turbinas a Gas (GT).**

Según (Hanachi, Mechefske, Liu, Banerjee, & Chen, 2018) señalan que la evolución de las estrategias de mantenimiento de las GT se desarrolló desde una estrategia correctiva predominante en sus inicios, pasando a una estrategia preventiva en poco tiempo y que perdura hasta la actualidad formando parte de muchas decisiones de mantenimiento. La desventaja de la estrategia preventiva es que no considera la condición actual de las máquinas ni de sus partes. Por ejemplo, se podría reemplazar una parte en buenas condiciones sólo porque su tiempo de almacenamiento está vencido o también en el otro extremo una parte podría fallar antes de que se le programe su mantenimiento. Es por ello que actualmente se complementa las estrategias anteriormente indicadas con técnicas más actuales que involucran el monitoreo de condiciones las cuales son estrategias que a través de una data confiable pueden dar predicciones mucho más adecuadas lo que permite ahorrar mucho tiempo y dinero durante la operación de las GT.

La figura 2 muestra la evolución de estrategias de mantenimiento de turbinas de gas (GT):

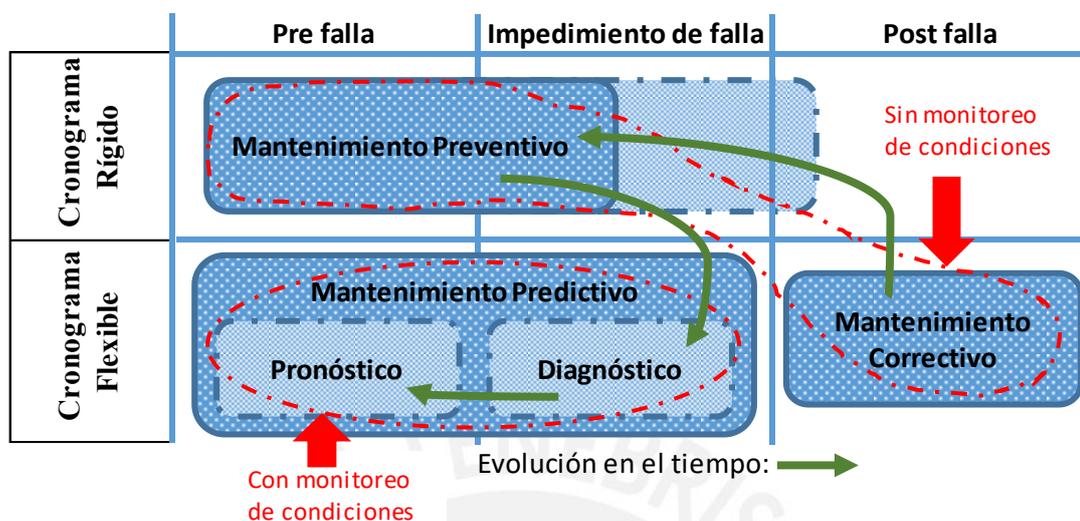


Figura 2. Evolución de Estrategias de Mantenimiento de Turbinas de Gas (GT). Adaptado de (Hanachi, Mechefske, Liu, Banerjee, & Chen, 2018)

El monitoreo de la salud de las GT en base a condiciones hace uso de toda la data disponible de base de datos de inspecciones interconectados online, así como de las bases de datos de inspecciones fuera de línea u *off-line* y mediciones. La tabla 1 muestra los indicadores de buen y mal desempeño que se obtienen a través de técnicas de monitoreo en línea u *on-line* de turbinas a gas.

Tabla 1

Tipos de Monitoreo en Línea y sus Indicadores

<b>Tipo de Monitoreo</b>	<b>Indicador</b>	<b>Campo afectado</b>
En línea	Buen desempeño	Potencia
En línea	Buen desempeño	Arrastre
En línea	Buen desempeño	Eficiencia térmica
En línea	Buen desempeño	Ratio de calor
En línea	Buen desempeño	Flujo de combustible
En línea	Buen desempeño	EGT
En línea	Mal Desempeño	Gases de escape contaminados
En línea	Mal Desempeño	Ruido y vibración
En línea	Mal Desempeño	Deterioro de aceite
En línea	Mal Desempeño	Restos de aceite
En línea	Mal Desempeño	Deshechos del aire de escape
En línea	Mal Desempeño	Puntas de álabes holgadas
En línea	Mal Desempeño	Tiempo de paso del álabe

Nota. Adaptado de “Performance-Based Gas Turbine Health Monitoring, Diagnostics, and Prognostics: A Survey” por Hanachi, H., Mechefske, C., Liu, J., Banerjee, A., & Chen, Y., 2018, *IEEE Transactions on Reliability*, 63, p. 342.

Del mismo modo, la tabla 2 muestra las técnicas que se emplean para poder hacer el monitoreo fuera de línea de turbinas a gas.

Tabla 2

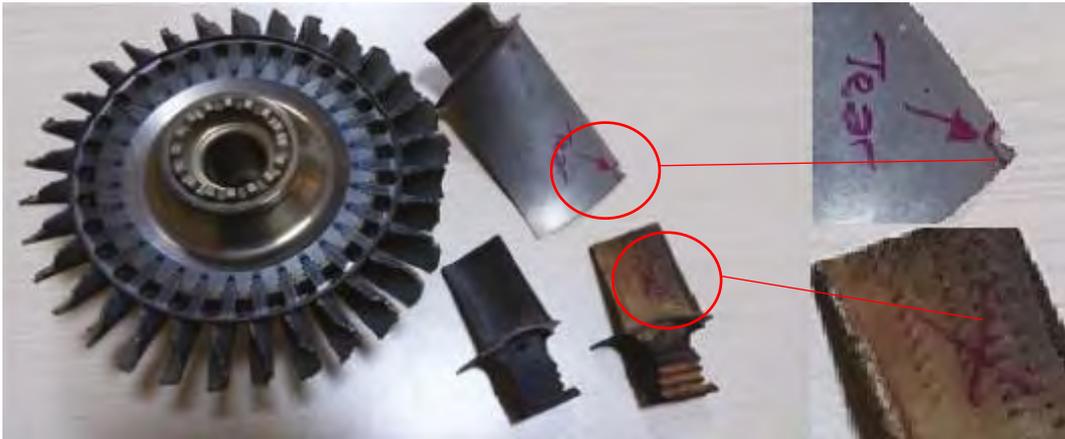
## Técnicas Empleadas en Monitoreos Fuera de Línea para Turbinas a Gas

<b>Tipo de Monitoreo</b>	<b>Técnica empleada</b>
Fuera de línea	Inspección Visual
Fuera de línea	Inspección boroscópica
Fuera de línea	Inspección por rayos X
Fuera de línea	Inspección por corrientes inducidas (Eddy Current)
Fuera de línea	Inspección por líquidos penetrantes
Fuera de línea	Pruebas por ultrasonido

Nota. Adaptado de “Performance-Based Gas Turbine Health Monitoring, Diagnostics, and Prognostics: A Survey” por Hanachi, H., Mechefske, C., Liu, J., Banerjee, A., & Chen, Y., 2018, *IEEE Transactions on Reliability*, 63, p. 342.

En el caso de las turbinas a gas de aeronaves existen métodos modernos de monitoreo de condiciones que tienen como objetivos minimizar los costos de mantenimiento. Adicionalmente, haciendo un monitoreo de los álabes internos podemos incrementar la seguridad de la aeronave (Bing, Lei, Wang, & Gao, 2017) y reducir el consumo de combustible (Petek & Hamilton, 2005). Los parámetros monitoreados en estas turbinas normalmente son la velocidad de los fans o ventiladores, vibración, presión de aceite, temperatura de aceite, temperatura del gas de eyección (EGT) y flujo de combustible de acuerdo a (Yildirim & Kurt, 2018). Una alteración de estos parámetros, indica que hay un defecto en la máquina, debido a que estas turbinas están sujetas a altas temperaturas de funcionamiento, altas velocidades de operación y presiones las cuales ocasionan desgastes en las partes internas en el tiempo.

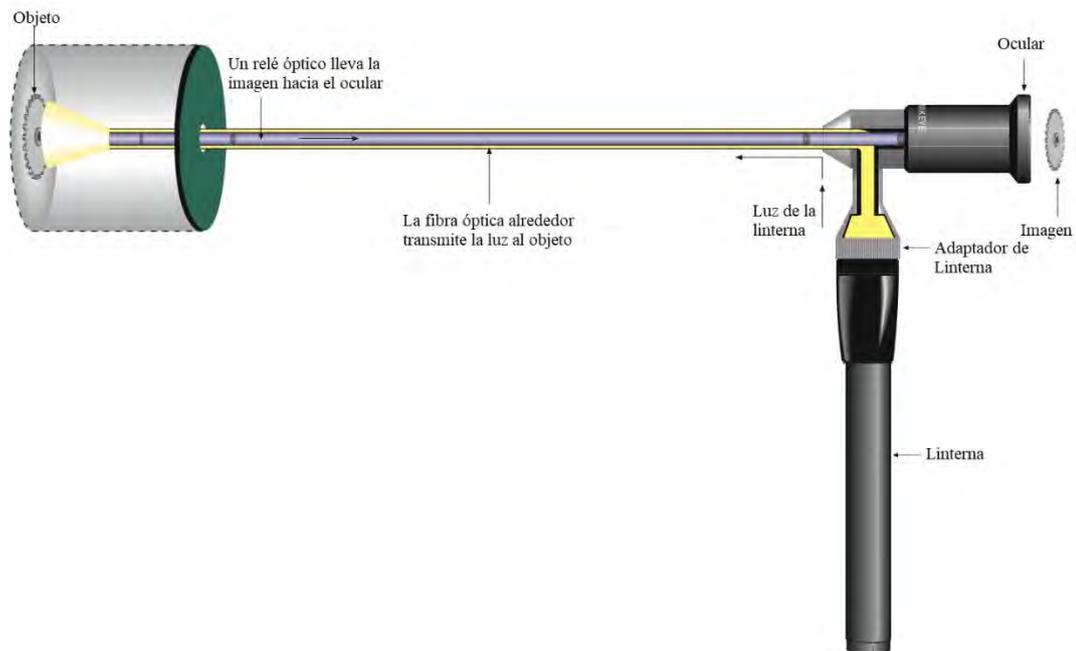
En la figura 3 podemos apreciar algunos de los elementos o partes dañadas de una GT.



*Figura 3.* Ejemplo de Fallas en un Motor de Aeronave. Adaptado de “Aircraft Gas Turbine Engine Health Monitoring System by Real Flight Data” por Yildirim, M. T., & Kurt, B., 2018, *International Journal of Aerospace Engineering*, 2018, p. 3  
Copyright 2018 by the International Journal of Aerospace Engineering

### 1.1.3. Inspecciones Boroscópicas

De acuerdo a (Almasi, 2016), un boroscopio es un dispositivo óptico, el cuál consiste de un tubo flexible o rígido con un ocular o monitor en un extremo y un lente objetivo en el otro extremo, ambos unidos a través de un relevo o relé. Con esto se forma una imagen de un objeto iluminado por los lentes objetivos, normalmente se producen imágenes de gran calidad. Los boroscopios son empleados para trabajos de inspección visual donde el área a ser inspeccionada es normalmente inaccesible. De acuerdo a la tabla 1, las inspecciones boroscópicas pueden agruparse dentro del tipo de inspecciones visuales y que a su vez corresponden al monitoreo de tipo fuera de línea. Este tipo de inspecciones consiste en poder obtener imágenes de los componentes internos de una GT para poder obtener datos que al procesarse nos dan información del estado de desgaste interno del motor o GT. Un ejemplo de este tipo de sistemas se puede apreciar en la figura 4.



*Figura 4.* (Sistema para Inspección Boroscópica). Recuperado de <https://en.wikipedia.org/wiki/Borescope#/media/File:BorescopeSchematic.png>

Con el avance de la tecnología actualmente se emplean videoscopios que tienen una gran capacidad de poder producir información a través de las imágenes que se obtienen de los componentes internos de la turbina los cuales están sometidos a altas temperaturas y velocidades. En la figura 5 se puede apreciar un equipamiento de un videoscopio para turbinas de gas comercial moderno, el cual se caracteriza por su portabilidad, dicho equipo consta de una sonda flexible la cual porta en la punta o tip una mini cámara con resolución suficiente para poder inspeccionar los componentes internos de la GT. Tiene una unidad de cómputo y una pantalla en la cual se visualiza las imágenes de las partes inspeccionadas y un joystick en la parte inferior de la pantalla la cual a través de componentes micromecánicos puede cambiar la orientación del tip de la sonda generalmente en cuatro direcciones.



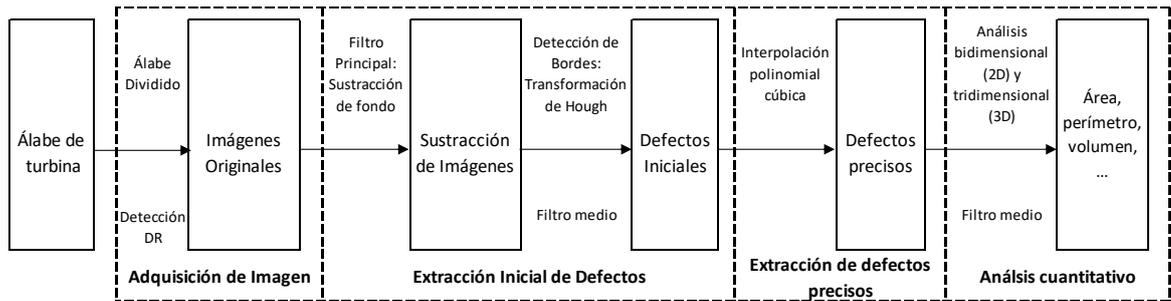
*Figura 5.* (Típico Videoscopio para Inspecciones Boroscópicas de una GT).  
Recuperado de <http://www.pacific-tec.sg/videoscopes-visual-inspection/>

La causa raíz de las degradaciones de las turbinas de gas son principalmente en la cámara de combustión, las secciones de terminales calientes y las secciones calientes de la turbina. Normalmente una turbina está diseñada con 20 puertos para boroscopio lo que permite el acceso a componentes críticos en el corazón de las turbinas de gas. Las inspecciones boroscópicas se ejecutan normalmente una vez cada año o cada 7000 horas de operación para las que operan con gas natural, 5000 horas de operación para turbinas que emplean otros combustibles y en el caso de turbinas de aeronaves, los intervalos de intervención pueden ser mucho más pequeños como de alrededor de 600 u 800 horas de operación. La primera inspección boroscópica establecerá la línea base de la data para futuras inspecciones, la clave es poder comparar imágenes de las inspecciones pasadas (especialmente con la primera) con

las actuales para poder reconocer los cambios y así determinar un cronograma de intervención. La decisión de abrir una sección de una turbina para hacer inspecciones adicionales se basa en el resultado de las inspecciones boroscópicas y los datos del fabricante que puedan proporcionarse para los defectos típicos de cada tipo de turbina.

#### **1.1.4. Detección en 3D de Defectos de Álabes de Turbinas de Gas (Radiografía Digital):**

Los álabes son importantes partes de las turbinas de gas y un defecto como rajaduras y agujeros en estas partes pueden ocurrir en cualquier tipo de turbina. Además, debido al difícil ambiente de trabajo, estos defectos tienen un gran efecto en la operación segura de las turbinas de gas en sus aplicaciones prácticas (Bing, Lei, Wang, & Gao, 2017). Las técnicas de inspección no destructivas (NDT) han sido empleadas por un gran rango de industrias como precaución para evitar accidentes o situaciones de emergencia para seres humanos y el medio ambiente de acuerdo a (Erhard, 2013). La radiografía digital (DR) es usada en mayor frecuencia en el campo de inspecciones no destructivas (NDT) debido a su mayor eficiencia, alta precisión, operación en tiempo real. En lugar de la película de radiografía tradicional, un sistema DR usa detectores de paneles planos para obtener una imagen de radiografía digital del objeto en prueba. En dichos detectores, la energía de los rayos X se convierte directamente en una señal eléctrica que es digitada en una imagen radiográfica digital (Wang, Li, Chen, & Jiang, 2015) y (Riffo & Mery, 2011).



*Figura 6.* Procedimiento Completo para Detectar Defectos de Álabes de Turbinas y su Análisis de Acuerdo a la Técnica de Radiografía Digital (basado en Bing, Lei, Wang, & Gao, 2017).

### 1.1.5. Otros trabajos relacionados a la investigación

(Ng, 2014) hace referencia a los avances relacionados con las nuevas tecnologías desarrolladas por la compañía General Electric en los últimos diez años. La mejora de las mediciones estereoscópicas 3D que es una mejora de la tecnología 2D. Un aspecto importante de este tipo de equipos es que avanza en el modelamiento en 3D de las fallas para dar un mejor criterio de evaluación de los daños al usuario. Sin embargo, los críticos de este tipo de tecnologías señalan que los modelos sólo muestran alta eficiencia con superficies regulares que podrían generarse a través de un desgaste uniforme de componentes, lo que no siempre es así. Adicionalmente estos equipos son de los más costosos del mercado y no muestran un nivel de precisión tan diferenciado con las tecnologías anteriores.

Por otro lado (Inanc, 2005) desarrolla un modelo combinado entre un equipo boroscópico y uno de ultrasonido para moldear los cambios en las superficies de ciertos objetos para poder modelar dicha superficie. Esta técnica podría usarse como referencia para poder intentar modelar una falla en 3D ya que hace el empleo de triangulación de imágenes para formar las

superficies, las desventajas para poder aplicar estos métodos son que emplean una sonda rígida y un equipo adicional de ultrasonido.

Finalmente, ( Yan-ying, Zhi-gang, & Qing-ji , 2019) desarrollan un modelo de detección de bordes para poder detectar rajaduras internas de los equipos, es decir potencian un equipo comercial simple para incluir herramientas de la visión por computadora para mejorar la calidad de las inspecciones de los interiores de las turbinas. Para el caso de la presente investigación se incluyó la etapa de detección de bordes para poder detectar los bordes de las rajaduras u otros defectos que indican los fabricantes.

### **1.1.6. Soluciones Comerciales**

#### **1.1.6.1. Videoscopio Mentor Visual iQ de General Electric**

Este tipo de equipos desarrollados por la compañía Estado Unidense General Electric cuenta con un sistema de tecnología 3D que permite mapear, medir y analizar indicadores en 3D, también permite compartir imágenes y datos de manera inalámbrica. Las tecnologías patentadas incluyen: medición en fase 3D, medición estéreo en 3D, medición estéreo, medición de comparación y PC remediación.

Estos equipos ofrecen un alto grado de precisión en diversos tipos de fallas: Menos de 1% de error en mediciones de longitud de una rajadura en mediciones de 5 a 30 mm y menos del 5% para mediciones de profundidad de foso o abolladura.

En la figura 7 se puede apreciar uno de los equipos más sofisticados desarrollado por la empresa General Electric.



*Figura 7.* (Equipo Visual iQ Videoprobe de GE). Recuperado de <https://www.llogsa.mx/mentor-visual-iq/>

#### **1.1.6.2. Videoscopio IPLEX G Lite de Olympus**

Este equipo desarrollado por la empresa japonesa Olympus utiliza la tecnología de medición estereoscópica que le permite medir distancia entre dos puntos, distancia de un punto a una línea, la distancia ortogonal de la profundidad o altura entre un punto y un plano definido, también permite medir áreas y líneas.



*Figura 8.* (Equipo IPLEX G Lite de Olympus). Recuperado de [https://www.novuslight.com/olympus-launches-iplex-g-lite-ultra-portable-industrial-videoscope\\_N8131.html](https://www.novuslight.com/olympus-launches-iplex-g-lite-ultra-portable-industrial-videoscope_N8131.html).

Aunque la tendencia actual es poder reemplazar las turbinas a gas, que ocasionan emisión de gases de contaminación y requieren alto nivel de intervención de mantenimiento, con otro tipo de tecnologías como es el caso de turbinas de viento para poder generar energía eléctrica o mecánica, existe el mercado de la industria aeronáutica que siempre requerirá el uso de esta técnica no destructiva de inspección. Adicionalmente las inspecciones boroscópicas aplican también a los generadores eléctricos de viento.

### **1.1.6.3. Videoscopio de medición laser SP100 de Karl Storz**

Este equipo fabricado por la empresa alemana Karl Storz, emplea la tecnología de medición laser que proporciona un nivel de precisión muy buena para mediciones en lugares de difícil acceso. Para poder procesar la imagen el equipo genera archivos de tipo ojo rojo (.tpi) que pueden extraer información de la luz láser aplicada al proceso de captura de imágenes. Para continuar con el procesamiento de imágenes se utiliza el programa Techno Pack X Desktop y

se pueden realizar mediciones de tipo distancia, profundidad, punto a superficie, línea a punto, multilínea y área (polígono). El programa brinda la facilidad de convertir los archivos tipo .tpi a .jpg para que puedan ser observados con cualquier tipo de ordenador ya que los archivos .tpi contienen información que sólo puede ser empleado por el programa Techno Pack X Desktop que mide los objetivos deseados para hacer el análisis de los defectos estudiados (figura 10), mientras que el formato .jpg se emplea para que el usuario final aprecie los resultados como se muestra.

La principal desventaja del SP100 frente a los videoscopios portátiles es su peso y volumen, lo cual permite que los segundos cumplan su objetivo de portabilidad y se pueden operar manipular con una sola mano mientras que el SP100 incluso debe tener una alimentación constante de corriente alterna de 220 VAC.



*Figura 9.* (Videoscopio SP100 de Karl Storz). Recuperado de <http://www.directindustry.es/prod/karl-storz-ndtec-gmbh/product-23440-1804761.html>



Figura 10. Entorno del programa Techno pack de Karl Stortz.

Como se aprecia en las tecnologías mostradas, se tiene equipos muy sofisticados que ofrecen solución a las diversas industrias para poder realizar la inspección remota del interior de las turbinas a gas. Uno de los factores clave del éxito de estos equipos es la capacidad de poder estimar mediciones con un nivel de precisión alto y es lo que lo diferencia de la mayoría de soluciones disponibles en el mercado, siendo este valor agregado también la razón del alto costo de estos equipos (entre 5 y 10 veces el costo de un videoscopio ordinario).

Otra técnica para poder hacer la medición de los daños es haciendo uso de las mediciones estereoscópicas. Los seres humanos tenemos la capacidad de poder estimar la distancia y el tamaño de los objetos debido a la visión estereoscópica de los ojos (Mustafah, Noor, Hasbi, & Wong Azma, 2012), gracias a esta metodología, estos autores desarrollaron un modelo de mediciones estereoscópicas en tiempo real con una precisión de +/- 25 cm con objetivos que alcanzaban los 10 metros (2.5 % de variación). Otro tipo de sistemas de medición que se pueden

emplear se basa en el uso de distancias relativas como referencia, por ejemplo (Rahman, y otros, 2009) emplean la distancia relativa entre los ojos de una persona para poder estimar la medida de la distancia entre la cámara y la persona. Un modelo adicional indicado por (Wahab, Sivadev, & Sundaraj, 2011) nos propone un sistema de una sola cámara para estimar la profundidad relativa de los objetos con respecto a un robot, en este modelo se emplea un modelo matemático denominado la transformada de Hough, lo que nos da un indicio de que para poder emplear una única cámara en la medición de distancias se deberá recurrir al uso de modelos matemáticos para estimar parámetros. Para atender el problema de la medición en el presente trabajo, se hará uso de un tipo de medición referencial, este tipo de medición se hace en base a medidas conocidas que se dan dentro de la imagen con la finalidad de obtener la medida a través del sistema propuesto.

## **1.2. Objetivos**

A continuación, se muestra el objetivo principal del presente trabajo y posteriormente los objetivos específicos.

### **1.2.1. Objetivo Principal**

- Clasificar los defectos captados por el boroscopio usando algoritmos de visión artificial y poder predecir la gravedad o severidad de los mismos de acuerdo a los estándares establecidos usados en los mantenimientos predictivos de turbinas a gas.

### 1.2.2. Objetivos Específicos

- Generar una solución que sea compatible para varios tipos de turbinas livianas o pequeñas ya que las ofertas comerciales ofrecen soluciones para turbinas de mayor envergadura.
- Lograr una solución alterna a las existentes en el mercado que permita mejorar el costo beneficio de la inversión.
- Lograr un diseño alternativo preliminar mecánico automático donde incluya los esbozos obtenidos en base a una metodología de diseño mecatrónico.



## Capítulo 2

### MARCO TEÓRICO

En este capítulo se da un marco conceptual de la visión computacional y más precisamente sobre el procesamiento de imágenes. Para este último se hará una revisión de los algoritmos empleados para poder reconocer las fallas de los componentes internos de una turbina de gas, como guía para identificar las fallas a detectar se mostrará también las fallas a detectar que son dictadas por el fabricante.

#### **2.1. Calibración de Cámara, Método de Zhengyou Zhang**

Toda cámara cuenta con parámetros extrínsecos los cuales principalmente se componen de tres parámetros de rotación, tres de traslación y otros parámetros intrínsecos. Los parámetros extrínsecos de la cámara definen la ubicación en el sistema global de coordenadas y los parámetros intrínsecos definen las relaciones entre las coordenadas de los píxeles y las coordenadas de la imagen de la cámara (Krig, 2016).

La calibración de cámaras juega un papel importante en la aplicación de técnicas fotogramétricas para obtener información de imágenes 2D. En la técnica propuesta (Zhang, 2000) se emplea un calibrador similar a una cuadrícula de un tablero de ajedrez, la cual nos permitirá determinar los parámetros intrínsecos y extrínsecos de la cámara. Esta técnica requiere que la cámara observe un patrón en un plano que es visto al menos en dos orientaciones diferentes, tanto la cámara como el patrón pueden moverse libremente sin necesidad de conocer el tipo de movimiento creando así un modelamiento de la distorsión radial de los lentes.

Para poder clasificar los tipos de calibración existente podemos definir dos grupos: calibración fotogramétrica y auto calibración.

### **2.1.1. Calibración Fotogramétrica**

En este caso la calibración se hace observando un objeto de calibración cuya geometría tridimensional es muy bien conocida, esta calibración se puede hacer de manera muy eficiente (Faugeras O. , 1993), este enfoque requiere un aparato calibrador costoso y una configuración elaborada.

### **2.1.2. Autocalibración**

Las técnicas de esta categoría no necesitan ningún objeto calibrador más que el movimiento de la cámara en una escena estática. La rigidez de la escena nos brinda en general dos restricciones (Maybank & Faugeras , 1992) de los parámetros internos de la cámara por el desplazamiento

de ésta al utilizar únicamente la información de la imagen. Como consecuencia, si tomamos tres imágenes con la misma cámara con parámetros internos fijos, las correspondencias entre tres imágenes son suficientes para recuperar tanto los parámetros internos como los parámetros externos de la cámara, lo cual nos permitirá reconstruir la estructura tridimensional similar (Hartley, 1994) y (Faugeras & Luong, 1997). Pese a que este enfoque es muy flexible, aún no ha madurado debido a los diferentes parámetros a estimar y los resultados no son siempre confiables.

La base para el tipo de calibración que se emplea es el Sistema de Visión de Escritorio o DVS por sus siglas en inglés. Esta técnica consigue resultados más robustos que el de la autocalibración.

### **2.1.3. Ecuaciones Básicas**

Se examina las restricciones en los parámetros intrínsecos de la cámara dada observando un único plano, para ello emplearemos las notaciones descritas.

#### **2.1.3.1. Notaciones**

Sea “m” un punto en un plano bidimensional “2D” el cual es denotado por  $m = [u, v]^T$ , un punto tridimensional 3D es denotado por  $M = [X, Y, Z]^T$ , los cuales se pueden apreciar en la figura 11 de manera ilustrativa (m es las coordenadas en el plano de la imagen y M es la coordenada en el plano del mundo real).

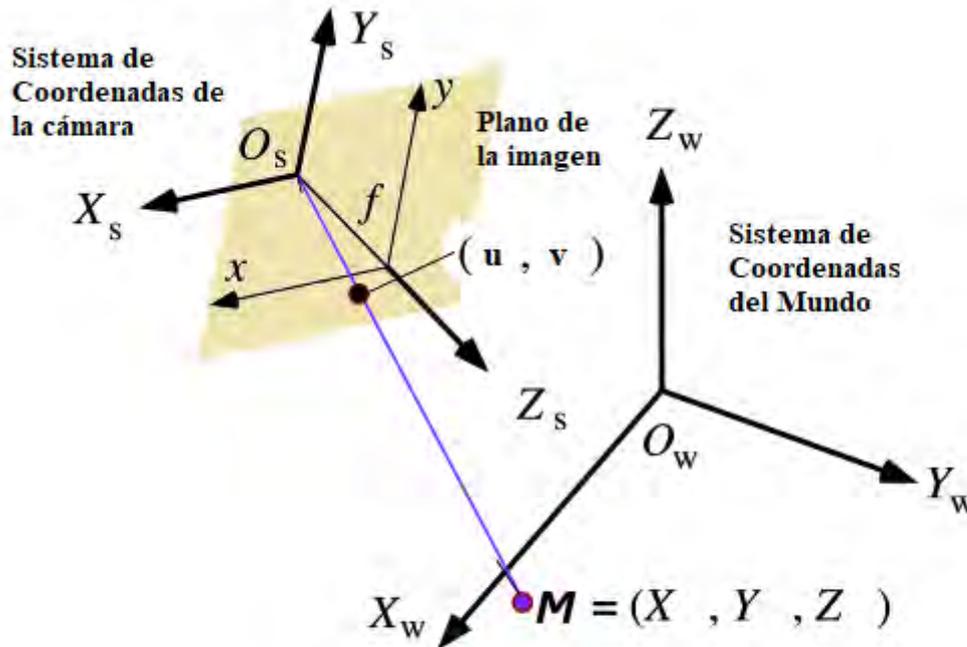


Figura 11. Coordenadas de un Punto M en el Plano de la Imagen. Adaptado de (Klette, 2014).

Empleamos  $\tilde{m}$  para denominar al vector aumentado al añadir la unidad como último elemento:  $\tilde{m} = [u, v, 1]^T$  y  $\tilde{M} = [X, Y, Z, 1]^T$ . Una cámara se puede modelar como un agujero de alfiler: La relación entre un punto en el espacio  $M$  y la proyección de su imagen  $m$  se da por:

$$s\tilde{m} = A[R \ t]\tilde{M}, \text{ con } A = \begin{bmatrix} \alpha & \gamma & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots (1)$$

Siendo  $s$  un factor escalar arbitrario,  $(R, t)$  se denominan parámetros extrínsecos y representan la matriz de rotación y traslación las cuales relacionan el sistema de coordenadas del mundo real con el sistema de coordenadas de la cámara. Finalmente,  $A$  representa la matriz de parámetros intrínsecos de la cámara.

Se considera  $(u_0, v_0)$ , las coordenadas del punto principal,  $\alpha$  y  $\beta$  son los factores escalares de la imagen con ejes  $u$  y  $v$ , finalmente  $\gamma$  es el parámetro que describe la oblicuidad de los dos ejes de la imagen.

A modo de abreviación, se emplea  $A^{-T}$  para denotar  $(A^{-1})^T$  o  $(A^{-1})^T$ .

### 2.1.3.2. Homografía entre el plano de modelo y su imagen:

Sin perder la generalidad, se considera que el plano de modelo está en  $Z = 0$  del sistema de coordenadas del mundo real.

Considerando la  $i$ -ésima columna de la matriz de rotación  $R$  como  $r_i$ , de (1) tenemos:

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix}$$

Utilizando las notaciones definidas,  $M$  seguirá representando un punto en el plano modelo, siendo  $M = [X, Y]^T$  debido a que  $Z = 0$ , también  $\tilde{M} = [X, Y, 1]^T$ . Como resultado un punto  $M$  en el plano modelo y su imagen  $m$  están relacionados por una homografía  $H$ :

$$s\tilde{m} = H\tilde{M}, \text{ donde } H = A \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & t \end{bmatrix} \dots (2)$$

La matriz  $H_{3 \times 3}$ , se define como si se tratara de un factor de escala.

### 2.1.3.3. Restricciones de los parámetros intrínsecos:

Dada una imagen del plano modelo, se puede estimar una homografía  $H$ , sea esta homografía:

$$H = [h_1 \quad h_2 \quad h_3]$$

De (2), tenemos:

$$[h_1 \quad h_2 \quad h_3] = \lambda A [r_1 \quad r_2 \quad t]$$

Siendo  $\lambda$  un escalar arbitrario. Sabiendo que  $r_1$  y  $r_2$  son ortogonales, tenemos:

$$h_1^T A^{-T} A^{-1} h_2 = 0 \dots (3)$$

$$h_1^T A^{-T} A^{-1} h_1 = h_2^T A^{-T} A^{-1} h_2 \dots (4)$$

Estas son las dos restricciones básicas de los parámetros intrínsecos, dada una homografía. Debido a que la homografía tiene 8 grados de libertad y hay 6 parámetros extrínsecos (tres de rotación y tres de traslación), sólo podemos obtener 2 restricciones en los parámetros intrínsecos. Notar que  $A^{-T} A^{-1}$  en realidad describe la imagen de la cónica absoluta (Faugeras & Luong, 1997), a continuación, procederemos a dar una interpretación geométrica.

### 2.1.3.4. Interpretación Geométrica:

Ahora relacionamos las ecuaciones (3) y (4) a la cónica absoluta (Faugeras & Luong, 1997).

Se verifica que el plano modelo, bajo nuestra convención, se describe en el sistema de coordenadas de la cámara por la siguiente ecuación:

$$\begin{bmatrix} r_3 \\ r_3^T t \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ w \end{bmatrix} = 0,$$

Donde  $w = 0$  para puntos en el infinito y  $w = 1$  para otros casos. Este plano intersecta el plano en el infinito en una línea, se aprecia que  $\begin{bmatrix} r_1 \\ 0 \end{bmatrix}$  y  $\begin{bmatrix} r_2 \\ 0 \end{bmatrix}$  son dos puntos en dicha línea, cualquier otro punto en esta línea es una combinación de estos dos puntos, por ejemplo:

$$x_\infty = a \begin{bmatrix} r_1 \\ 0 \end{bmatrix} + b \begin{bmatrix} r_2 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ar_1 + br_2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Ahora calculamos la intersección de esta línea con la cónica absoluta. Por definición, el punto  $x_\infty$  que se conoce como punto circular (Semple & Kneebone, 1958), satisface:

$$x_\infty^T x_\infty = 0, \text{ por ejemplo } (ar_1 + br_2)^T (ar_1 + br_2) = 0, \text{ o } a^2 + b^2 = 0$$

La solución es  $b = \pm ai$ , donde  $i^2 = -1$ . Eso quiere decir que los dos puntos de intersección son  $x_\infty = a \begin{bmatrix} r_1 \pm ir_2 \\ 0 \end{bmatrix}$ . La importancia de este par conjugado de números complejos recae en el hecho de que son invariantes para las transformaciones euclidianas. Su proyección en el plano de imagen se da, por un factor escalar, por:

$$\tilde{m}_\infty = A(r_1 \pm ir_2) = h_1 \pm ih_2,$$

El punto  $\tilde{m}_\infty$  se ubica en la imagen de la cónica absoluta, descrita por  $A^{-T}A^{-1}$ . Lo que nos da:

$$(h_1 \pm ih_2)^T A^{-T} A^{-1} (h_1 \pm ih_2) = 0$$

Requiriendo que tanto la parte real como la parte imaginaria sean cero produciendo las ecuaciones (3) y (4).

### 2.1.4. Resolviendo la Calibración de la Cámara

Para hacer la calibración de la cámara se inicia con una solución analítica, seguido de una técnica de optimización no lineal que se basa en el criterio de máxima probabilidad. Finalmente, se toma en cuenta la distorsión de los lentes de la cámara dando tanto la solución analítica como la solución no lineal.

Sea:

$$B = A^{-T} A^{-1} \equiv \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{12} & B_{22} & B_{23} \\ B_{13} & B_{23} & B_{33} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{1}{\alpha^2} & -\frac{\gamma}{\alpha^2\beta} & \frac{v_0\gamma - u_0\beta}{\alpha^2\beta} \\ -\frac{\gamma}{\alpha^2\beta} & \frac{\gamma^2}{\alpha^2\beta^2} + \frac{1}{\beta^2} & -\frac{\gamma(v_0\gamma - u_0\beta)}{\alpha^2\beta^2} - \frac{v_0}{\beta^2} \\ \frac{v_0\gamma - u_0\beta}{\alpha^2\beta} & -\frac{\gamma(v_0\gamma - u_0\beta)}{\alpha^2\beta^2} - \frac{v_0}{\beta^2} & \frac{(v_0\gamma - u_0\beta)^2}{\alpha^2\beta^2} + \frac{v_0^2}{\beta^2} + 1 \end{bmatrix}$$

Notar que la matriz B es simétrica, definida por un vector de seis dimensiones.

$$b = [B_{11}, B_{12}, B_{22}, B_{13}, B_{23}, B_{33}]^T \dots (6)$$

Sea  $h_i$  la  $i$ -ésima columna de la matriz H, tal que:

$$h_i = [h_{i1}, h_{i2}, h_{i3}]^T$$

Entonces tenemos:

$$h_i^T B h_j = \mathbf{v}_{ij}^T b \dots (7)$$

Con:

$$\mathbf{v}_{ij} = [h_{i1}h_{j1}, h_{i1}h_{j2} + h_{i2}h_{j1}, h_{i2}h_{j2}, h_{i3}h_{j1} + h_{i1}h_{j3}, h_{i3}h_{j2} + h_{i2}h_{j3}, h_{i3}h_{j3}]^T$$

Como resultado, las dos restricciones principales (3) y (4), de una homografía dada, pueden ser reescritas como dos ecuaciones homogéneas en b:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_{12}^T \\ (\mathbf{v}_{11} - \mathbf{v}_{22})^T \end{bmatrix} \mathbf{b} = 0 \dots (8)$$

Si se observan  $n$  imágenes del plano modelo, al definir “ $n$ ” ecuaciones como la descrita en (8), tenemos que:

$$V\mathbf{b} = 0 \dots (9)$$

Donde  $V$  es una matriz de  $2n \times 6$ . Si  $n \geq 3$ , tendremos una única solución  $\mathbf{b}$  definida hasta un valor escalar. Si  $n = 2$ , podemos imponer la restricción sesgada  $\gamma = 0$ , por ejemplo  $[0, 1, 0, 0, 0, 0] \mathbf{b} = 0$ , la cual se añade como una ecuación más a (9). (Si  $n = 1$ , sólo se pueden encontrar dos de los parámetros intrínsecos de la cámara, como  $\alpha$  y  $\beta$ , asumiendo que  $u_0$  y  $v_0$  son conocidos (ejem. Al centro de la imagen) y  $\gamma = 0$ , que es lo que lo hicieron (Shimizu, Zhang, Akamatsu, & Deguchi, 1998) para determinar la posición de la cabeza, basado en el hecho en el que los ojos y la boca son razonablemente coplanares. De hecho, (Tsai, 1987) había mencionado que la longitud focal de un plano es posible, pero incorrectamente dijo que el ratio de ancho y alto o ratio de aspecto no lo es). La solución a (9) es bien conocida como el vector propio de  $V^T V$  asociado con el más pequeño valor propio (equivalentemente, el vector singular por la derecha de  $V$  asociado con el valor singular más pequeño).

Una vez que se tiene estimado  $\mathbf{b}$ , podemos calcular todos los parámetros intrínsecos de la siguiente manera. La matriz  $B$ , descrita en la sección 2.1.4, es estimada hasta un valor escalar, por ejemplo  $B = \lambda A^{-T} A$ , con  $\lambda$  como un escalar arbitrario. Se puede extraer los parámetros intrínsecos de la matriz  $B$  únicamente:

$$v_0 = (B_{12}B_{13} - B_{11}B_{23}) / (B_{11}B_{22} - B_{12}^2)$$

$$\lambda = B_{33} - [B_{13}^2 + v_0(B_{12}B_{13} - B_{11}B_{23})] / B_{11}$$

$$\alpha = \sqrt{\lambda/B_{11}}$$

$$\beta = \sqrt{\lambda B_{11}/(B_{11}B_{22} - B_{12}^2)}$$

$$\gamma = -B_{12}^2 \alpha^2 \beta / \lambda$$

$$u_0 = \gamma v_0 / \alpha - B_{13} \alpha^2 / \lambda$$

Una vez que la matriz A se conoce, los parámetros extrínsecos de cada imagen fácil de calcular. De (2) tenemos:

$$r_1 = \lambda A^{-1} h_1, r_2 = \lambda A^{-1} h_2, r_3 = r_1 \times r_2, t = \lambda A^{-1} h_3$$

Con  $\lambda = 1/\|A^{-1}h_1\| = 1/\|A^{-1}h_2\|$ . Desde luego, debido al ruido en los datos, la así calculada matriz  $R = [r_1, r_2, r_3]$  no siempre satisface en general las propiedades de una matriz de rotación. La mejor matriz de rotación se puede obtener por ejemplo de la descomposición de un valor singular como lo señalan (Golub & Van Loan, 2013).

### 2.1.5. Estimación de la Máxima Probabilidad:

La anterior solución se halla a través de la minimización de una distancia algebraica que no tiene ningún significado físico. Podemos refinar esto a través de una inferencia de máxima probabilidad.

Tenemos como entrada n imágenes de un modelo plano y tenemos m puntos en el plano modelo. Asumiendo que los puntos de la imagen están corrompidos por un ruido idénticamente

distribuido. La máxima probabilidad estimada puede ser obtenida al minimizar la siguiente función:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \| m_{ij} - \hat{m}(A, R_i, t_i, M_j) \|^2 \dots (10)$$

Donde  $\hat{m}(A, R_i, t_i, M_j)$  es la proyección del punto  $M_j$  en la imagen  $i$ , de acuerdo a la ecuación (2). Una rotación  $R$  es parametrizada por un vector de tres parámetros, denotado por  $r$ , el cual es paralelo al eje de rotación y cuya magnitud es igual al ángulo de rotación,  $R$  y  $r$  son relacionados por la fórmula de Rodrigues (Faugeras O., 1993). Minimizar (10) es un problema de minimización no lineal, el cual es resuelto con el algoritmo de Levenberg-Marquardt (More, 1977) que se implementa en Minipack. Esto requiere unos valores iniciales de  $A$ ,  $\{R_i, t_i / i = 1, \dots, n\}$  el cual puede obtenerse empleando la técnica descrita en la sección anterior.

## 2.2. Visión Computacional

### 2.2.1. Concepto

Según (Szeliski, 2011), la visión computacional es una disciplina que busca de resolver la ingeniería inversa de una imagen en la se busca recuperar cierta información no dada para encontrar la solución completa de un problema recurriendo al uso de modelos físicos y probabilísticos para elegir entre soluciones ambiguas.

Los modelos directos empleados por la visión computacional se desarrollan a partir de la física (radiometría, óptica y diseño de sensores) y en gráficos por computadoras que hacen que se

capture proyecte las imágenes en una superficie plana o curva. El objetivo de la visión computacional es describir el mundo que se ve en una o más imágenes y reconstruir sus propiedades como su forma, iluminación y distribución de colores. Todo esto se logra con algoritmos de visión computacional, pero con la desventaja que dichos algoritmos son muy propensos al error mientras que para un ser humano e incluso un animal es una tarea muy simple.

La percepción de objetos es una característica fascinante del ser humano, gracias a ello podemos por ejemplo deducir de ciertas características de ciertos objetos reales como por ejemplo sus colores con sus respectivos contrastes, la forma de sus partes, en caso de que se dispongan de por ejemplo una fotografía podríamos identificar el nombre de las personas en la imagen, así como poder deducir el estado anímico de cada una de ellas.

Los investigadores en visión computacional, por otra parte, han desarrollado técnicas matemáticas para recuperar la forma tridimensional de los objetos. Se tienen por ejemplo técnicas confiables como la formación parcial de imágenes tridimensionales (3D) de un ambiente a partir de la superposición de miles de fotografías, también a partir de ciertas vistas de una fachada, podemos crear modelos superficies tridimensionales a partir del pareo estereoscópico, se podría también hacer el seguimiento de una persona a través de un fondo complejo, incluso se puede encontrar el nombre de todas las personas en una fotografía usando una combinación de rostros, ropa, y detección de cabello y su reconocimiento. Pese a todos estos avances resulta difícil que un computador pueda interpretar una imagen al mismo nivel que un niño de 2 años de edad.

## **2.2.2. Aplicaciones**

(Szeliski, 2011) nos señala ciertas aplicaciones de la visión computacional, la cuales muchas de ellas siguen vigentes hoy en día.

### **2.2.2.1. Reconocimiento óptico de caracteres (OCR por sus siglas en inglés)**

Reconoce los códigos postales escritos a mano en las cartas y reconocimiento automático de números de placa (ANPR por sus siglas en inglés), para lograrlo hace el empleo de redes neuronales de convolución que son un tipo especiales de redes neuronales multi capas, las cuales se entrenan con un algoritmo de retro propagación. Estas redes neuronales son diseñadas para reconocer patrones visuales directamente de imágenes pixeleadas con un pre procesamiento mínimo, pueden reconocer patrones con variabilidades extremas como el caso de palabras escritas a mano y presentan un alto grado de robustez a las distorsiones y transformaciones geométricas simples.

### **2.2.2.2. Máquinas de inspección**

Se aplica la visión computacional también en la inspección rápida de partes para aseguramiento de calidad, usando visión estéreo con iluminación especializada para medir tolerancias en las alas de aviones o partes de automóviles o también para la búsqueda de defectos en piezas de fundición de acero usando visión por rayos-X.

### **2.2.2.3. Seguridad vehicular**

Detección de obstáculos inesperados como peatones en las calles, bajo condiciones en las que la técnica de visión activa como radar o LIDAR. Por ejemplo, la filosofía de la compañía Mobileye en cuanto a visión por computadora, se basa en la idea de que, si un ser humano puede conducir un vehículo en base a la visión únicamente, entonces un computador también puede hacerlo. Lo que quiere decir que las cámaras son críticas para facilitar que un sistema automatizado alcance un nivel de percepción y actuación de tipo humano (<https://www.mobileye.com/our-technology/>).

Otras aplicaciones de la visión por computadora incluyen las tiendas de venta por menor o retail, el cual se aplica al reconocimiento de objetos para el pago automáticos en cajeros de supermercados. También en fotogrametría, en la construcción de modelos tridimensionales a partir de fotografías aéreas usadas en sistemas como Big Maps de Microsoft. El campo de imágenes médicas también se beneficia de la visión por computadora en los registros pre e intra operatorio de imágenes o en la ejecución de estudios de largo plazo de la morfología del cerebro de personas mientras estas envejecen. Por último, podemos citar el campo de la vigilancia en el que la visión por computadora se emplea para la detección de intrusos y análisis del tráfico en carreteras.

### **2.2.3. Arquitectura de un Sistema de Procesamiento de Imágenes**

Para poder realizar el procesamiento de imágenes se contará con la siguiente arquitectura:

- Un videoscopio con las siguientes características: Sonda flexible de aproximadamente 1.5 m. o más con controlador de tipo punta con la finalidad de orientar la cámara y la luz LED respectiva y 4.5 mm de diámetro o menor.
- Cámara con captura de imágenes de 640 x 480 píxeles o mayor.
- Capacidad de transferir datos con memoria de puerto USB.

Un equipo videoscopio que cumple con las condiciones previas es el modelo X1000 de la empresa Taiwanesa Mitcorp. La diferencia de este equipo con los mencionados en el estado de arte es que éste no cuenta con la tecnología de procesamiento de imágenes para poder reconocer defectos en el interior de las turbinas de gas a analizar.

Se requerirá también una Lap Top o PC personal en la que se hará el procesamiento de la imagen y se hará el empleo del software MatLab.

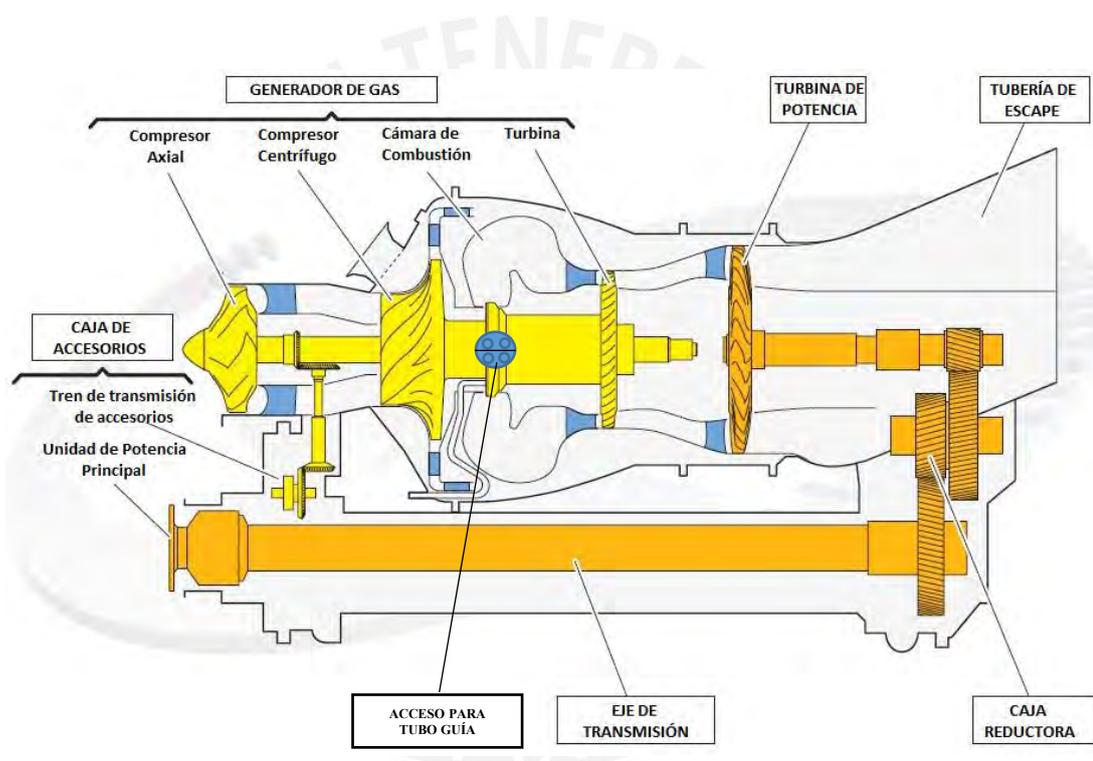
#### **2.2.4. Tipos de Fallas a Detectar en una Turbina Arriel 2E**

En este tipo de turbinas de gas se tienen las siguientes secciones comunes en las que se buscan defectos de manera remota con el uso de un boroscopio o videoscopio:

- Parte interna de la cámara de combustión.
- Plato de remolino de la cámara de combustión
- Inspección de los álabes de turbina y veletas de la inyección de la turbina.

Como modelo referencial tomaremos la guía de un motor Arriel 2E del fabricante Safran Helicopters. Aunque los datos técnicos para el procedimiento de inspección de las secciones internas del motor son exclusivos para esta variante de motor, los principios se aplican para cualquier otro modelo e incluso fabricante de motores.

En la figura 12 se puede apreciar el corte transversal de un motor Arriel 2E en el que se puede apreciar las secciones a inspeccionar con un la ayuda de un videoscopio.



*Figura 12.* Corte Transversal de un Motor Arriel 2E. Adaptado de (Turbomeca Training, 2014)

Las principales fallas a detectar dentro de estas turbinas se han resumido en la tabla 3.

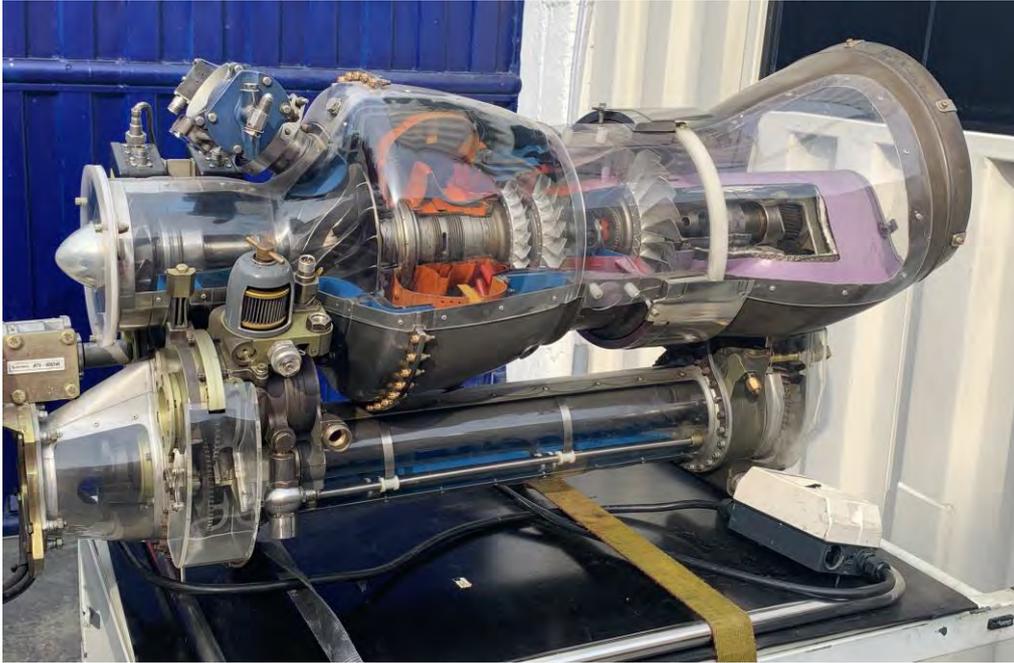
Tabla 3

## Clasificación de fallas a encontrar en una turbina de gas Arriel 2

Ítem	Componente o Sección	Defecto no permitido	Imagen de muestra	Observación
1	Interior de la cámara de combustión	Rajadura o grieta		También se debe tener cuidado de no encontrar abolladuras, distorsiones o quemaduras.
2	Plato de remolino frontal de la cámara de combustión	Rajadura o grieta		También se debe tener cuidado de no encontrar abolladuras, distorsiones o quemaduras.
3	Álabes de la turbina del generador de gas (M03)	Rajadura o grieta Abolladuras Astillas Distorsiones Anormalidades en la raíz del álabe		Se debe buscar rajaduras, impactos, marcas de erosión, marcas de corrosión, distorsiones, fricción en la punta de los álabes, hinchaduras y astillas
4	Álabes de la turbina del generador de gas (M03)	Desplazamiento posterior de los álabes		No se debe permitir un desplazamiento posterior de más de 0.5 mm

Nota. Información extraída del manual de mantenimiento de motor Arriel 2E N° No. X 292 R2 300 2, actualización 14 del 15 de junio de 2019.

En la figura 13 se muestra el corte de un motor Arriel de la misma familia del mostrado.



*Figura 13.* Fotografía de un Motor Arriel 1E. Motor exhibido por Safran HE en la feria Expomin 2019, Arequipa Perú

#### **2.2.5. Tipos de Fallas a Detectar en una Turbina PT6A**

De manera similar, las turbinas de la familia PT6A del fabricante Pratt&Whitney tienen criterios similares al momento de aplicar una inspección boroscópica. El resumen de las principales fallas a detectar se muestra en la tabla 4.

Tabla 4

## Clasificación de fallas a encontrar en una turbina de gas PT6A

Ítem	Componente / Sección	Defecto	Observación
1	Estator de la CT	Rajadura o grieta	Se debe medir las quemaduras en todo el borde de salida, máximo desgaste es de 5.842 mm
2	Álabes de la CT	Delaminación	Daños mayores a los mostrados deben ser sometidos a monitoreo.
		Cambio de color	
		Señales de sulfuración en álabes adyacentes.	
3	Revestimientos de la cámara de combustión	Delaminación	Se debe medir el área afectada y no permitir que se exceda 6.46 mm <sup>2</sup> (una pulgada cuadrada)
4	Engranajes de la AGB	Corrosión	Inspeccionar la parte interna de la AGB por corrosión
5	RGB	Desplazamiento posterior de los álabes	Se debe buscar señales de corrosión dentro de la carcasa de la caja de engranajes.

Nota. Información extraída del manual de mantenimiento de motor PT6A-34 N° 3021242, revisión 61 del 22 de julio de 2019.

Los componentes internos de un motor PT6A se pueden ver en la figura 14.



*Figura 14.* Imagen de las Partes de un Motor PT6A Empleado para Entrenamiento

#### **2.2.6. Etapas de la Visión por Computadora**

Las etapas de la visión computacional comprenden una serie de pasos que se deben seguir para poder lograr un adecuado procesamiento de las imágenes, en este caso de los componentes internos de las turbinas. Se proponen los pasos mostrados en la figura 15, los cuales son los pasos típicos de la visión por computadora.



*Figura 15.* Pasos de la Visión por Computadora

A continuación, se describe de modo general en qué consiste cada subproceso definido.

#### **2.2.6.1. Acondicionamiento de la imagen**

En esta etapa se hace hincapié en las consideraciones requeridas para que las imágenes se puedan procesar de manera adecuada. En este caso se considera la dificultad de acceso a la zona de los componentes a inspeccionar, el tamaño de la cámara se verá limitado a lo que señale los manuales del fabricante los cuales indican que el diámetro de la cámara con la respectiva sonda no debe exceder los 5 mm. Otro factor importante es la iluminación, al acceder a lugares internos de un sistema deben contar con la mejor iluminación posible y en el caso de nuestro sistema boroscópico se empleará iluminación con LEDs de luz blanca. El proceso de selección de estos elementos se ve de manera un poco más amplia en capítulo 3.

### **2.2.6.2. Captura de imagen**

Comprende la etapa en la que se adquiere las imágenes reales a través de un videoscopio cuyo modelo se propondrá en el capítulo 3 y servirá para proporcionar las imágenes a analizar. El equipo cuenta con capacidad de poder tomar fotografías y grabar videos.

### **2.2.6.3. Pre procesamiento de imágenes**

Según (Krig, 2016) el pre procesamiento de imágenes tiene como finalidad preparar las imágenes para análisis futuros, lo cual consiste en la extracción de características y puntos de interés. Para hacer una analogía, el pre procesamiento de una imagen es análogo a la normalización matemática de un conjunto de datos, lo que es un paso común en métodos de descripción de características. Una imagen pura probablemente no producirá buenos resultados para la visión por computadora, por ello la importancia de tener cuidado en esta etapa. Es común que se trabaje en modo binario para poder mejorar la imagen de entrada y obtener mejores resultados. En el presente trabajo se considera este factor ya que la idea inicial es poder integrar en el diseño futuro la capacidad de dotar al sistema boroscópico propuesto con inteligencia artificial de tal manera que con el uso de filtros para eliminar ruido y demás técnicas de preprocesamiento se lleguen a detectar fallas que se describieron anteriormente.

#### **2.2.6.4. Representación y descripción de fallas y segmentación**

La segmentación es un método de procesamiento de imágenes el cual se caracteriza por usar la textura de una imagen, en lugar del umbral, como para dividir una imagen en regiones conexas o polígonos. De igual modo a lo descrito en el preprocesamiento la idea de considerar esta etapa del procesamiento de imágenes para poder usarlo en el futuro en la segmentación para separar las imágenes para poder concentrarnos en el análisis de las fallas, es decir, se procederá a aislar los detalles de interés y a través de la descripción se obtendrán las mediciones deseadas como medidas, áreas, etc., de acuerdo a los patrones de falla correspondientes a cada fabricante de turbinas como por ejemplo las que se muestran en las tablas se muestran en las tablas 3 y 4.

#### **2.2.6.5. Reconocimiento de la falla**

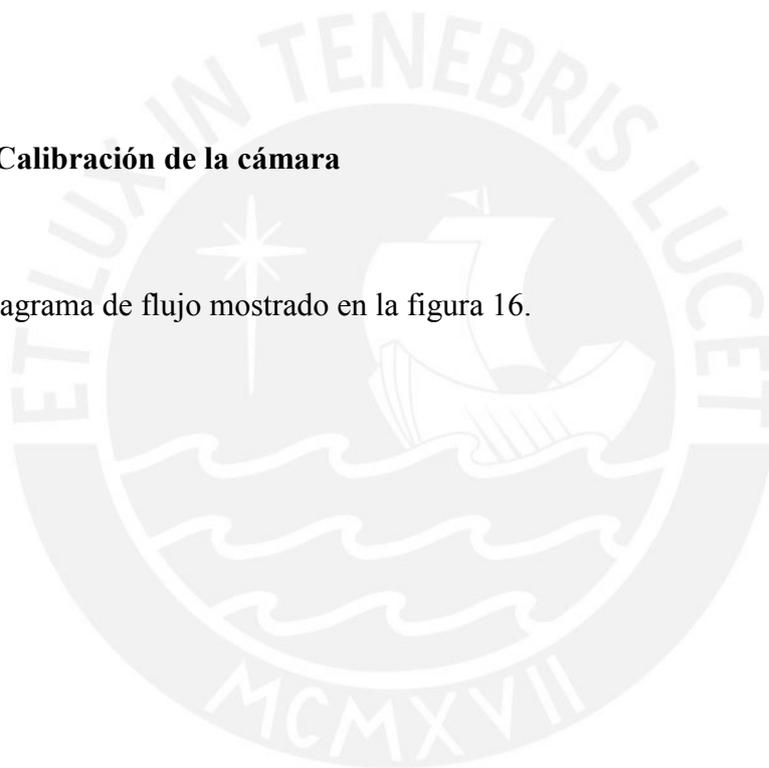
Finalmente, con la incorporación de inteligencia artificial se podrá incorporar en el diseño algoritmos que puedan identificar el mejor posicionamiento de la cámara para hacer la mejor medición de fallas e incluso determinar fallas típicas como por ejemplo el desgaste por erosión que se podría obtener al sacar la diferencia entre un álabe nuevo caracterizado el cual se compara con un álabe en estudio y cuyo desgaste puede obtenerse a través de una diferencia de áreas o en lugar de un álabe nuevo se podría comparar la imagen de un álabe con una imagen del mismo componente pero tomada con un menor uso de la GT. En los anexos 1, 2 y 3 se muestra un ejemplo del tipo de algoritmo que se podría emplear para obtener los reconocimientos de falla propuestos.

### **2.2.7. Diagramas de Flujo:**

Para poder obtener la medida de las fallas de los álabes y demás secciones a inspeccionar en las turbinas, se elabora dos algoritmos. Uno tiene por objetivo calibrar la cámara para obtener los parámetros intrínsecos y extrínsecos de la cámara empleada, el segundo algoritmo hace uso de los parámetros de la cámara para convertir la imagen en las coordenadas globales y con la imagen desdistorsionada obtener las medidas lineales de los segmentos a analizar.

#### **2.2.7.1. Calibración de la cámara**

Se presenta el diagrama de flujo mostrado en la figura 16.



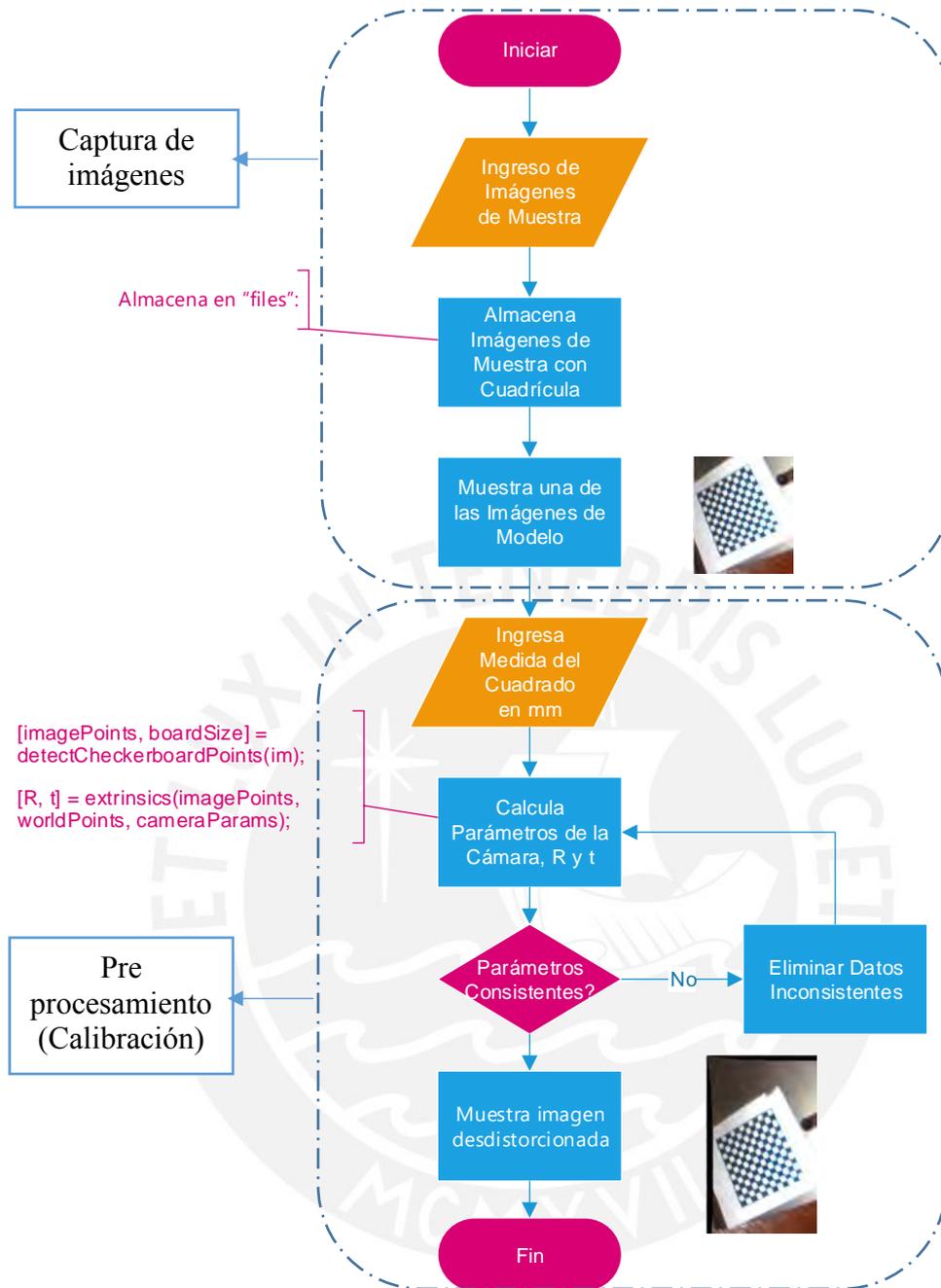


Figura 16. Diagrama de Flujo de la Calibración de la Cámara. Elaboración Propia

En el anexo 4 se puede apreciar el algoritmo empleado para la calibración de la cámara en el programa MatLab.

### 2.2.7.2. Medición de una falla

Se presenta el siguiente Diagrama de Flujo:

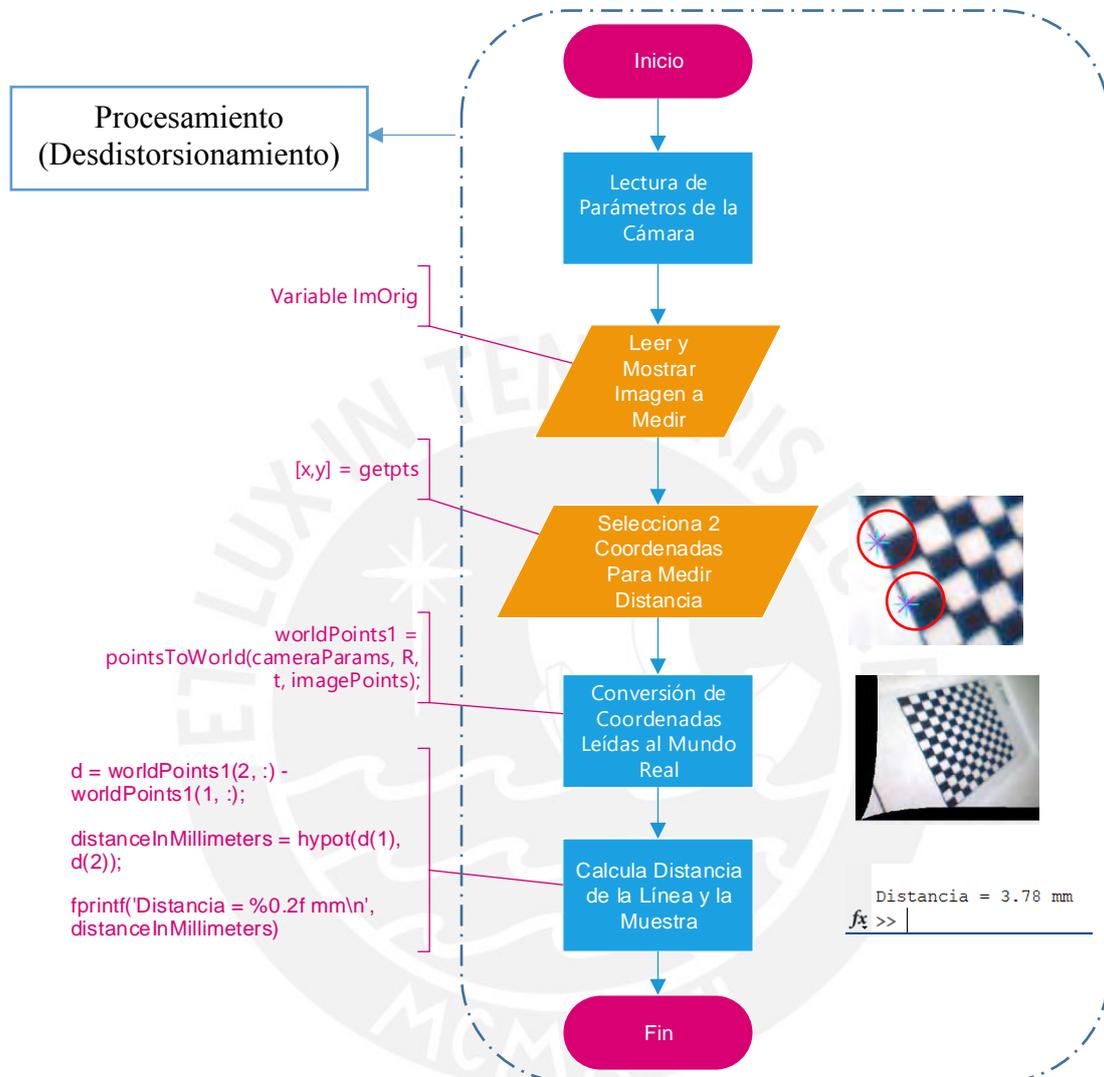


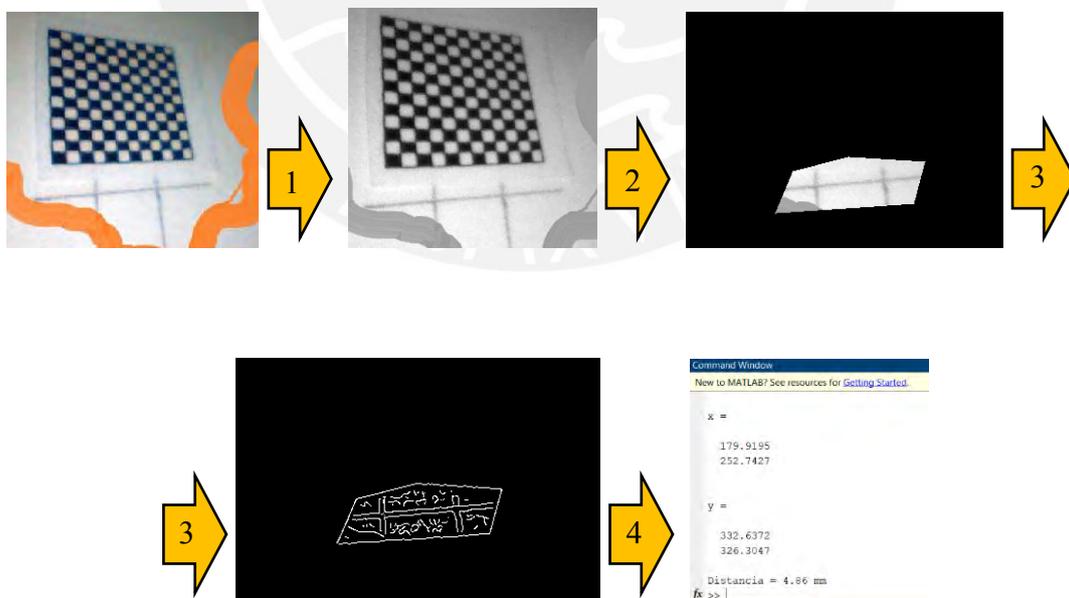
Figura 17. Diagrama de Flujo de Medición de Fallas. Elaboración Propia

En el anexo 4 se puede apreciar el programa en MatLab para poder aplicar la medición de defectos como rajaduras, endaduras, desgastes por erosión, etc.

### 2.2.8. Algoritmos Seleccionados y sus Características

Previo a cualquier procesamiento de imágenes, es de suma importancia contar con una cámara calibrada (el procedimiento y técnica de calibración empleados se describen detalladamente en la sección 2.1), que se enfoca en obtener los puntos del patrón de calibración y los parámetros extrínsecos de la cámara para poder obtener las coordenadas de los puntos de la imagen en el sistema de coordenadas del mundo real.

Una vez calibrada la cámara el procesamiento tiene las siguientes etapas: Conversión de la imagen a escala de grises, definición de la región de interés (para aislar la falla a estudiar), aplicación del filtro Canny para detectar los bordes de las líneas o áreas de interés y medición del defecto en base a los parámetros de calibración obtenidos en la etapa previa. El flujo del programa se puede apreciar en la figura 18.



*Figura 18.* Etapas del programa de procesamiento de imágenes: (1) Conversión a escala de grises o imagen binaria. (2) Determinación de la región de interés. (3) Aplicación de detección de bordes (filtro Canny) y (4) Aplicación de la conversión de las coordenadas de la imagen a las coordenadas del mundo real y determinación de la distancia entre dos puntos. Elaboración Propia.

En la figura 19 se muestra una imagen de unos álabes de compresor tal como se extraen de un videoscopio comercial, las imágenes se obtienen a color y se deben pasar a escala de grises.



*Figura 19.* Imagen del Álabes de un Motor PT6A Obtenida con un Videscopio

Por su parte la imagen de la figura 20 muestra también la imagen en escala de grises de un álabes dañado en uno de sus bordes. Este es un tipo de daños que se desea cuantificar para ver si se cumple las especificaciones del fabricante.



*Figura 20.* Imagen Convertida a Escala de Grises de un Álabes de Turbina.

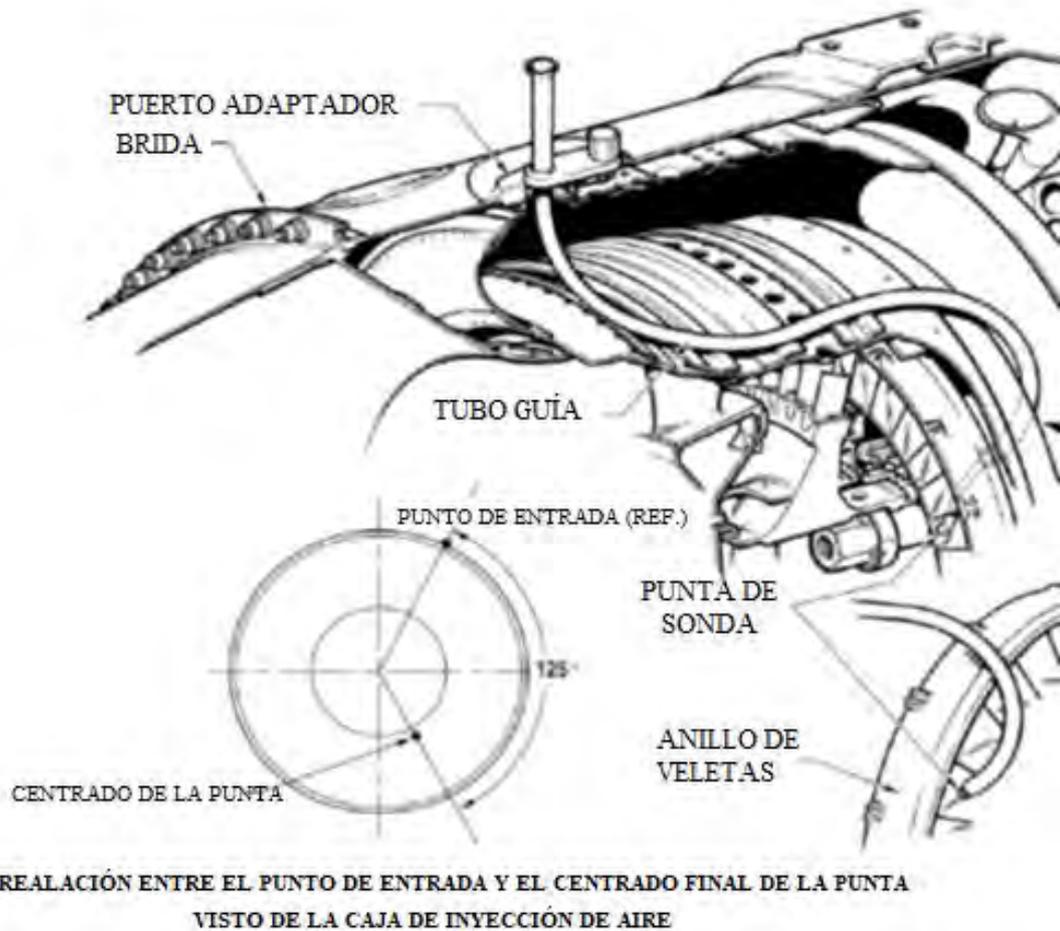
### 2.2.9. Ubicación de la Cámara para Poder Realizar la Captura de Imágenes

Las turbinas de gas para aviación requieren de un monitoreo constante de su condición, por ello se han diseñado accesos (por parte de los diferentes fabricantes) que permiten el acceso de la sonda de manera libre hasta la zona de inspección de las partes en cuestión (zona caliente del motor). Por ejemplo, en la figura 21 se muestra el proceso de instalación de la sonda de un videoscopio.



*Figura 21.* Guía de Instalación Para Inspección Boroscópica en un Motor PT6A. Adaptado de (Pratt & Whitney, 2019)

En el caso de la figura 20 se muestra el montaje externo del sistema. Sin embargo, para poder hacer un acercamiento adecuado hacia los componentes a inspeccionar (fotografiar o grabación de video), el motor cuenta con un tubo guía adecuado para poder acceder al área de estudio, en la figura 22 se muestra la instalación de dicho tubo guía, por el cual se conducirá la sonda del videoscopio.



*Figura 22.* Forma de Insertar una Sonda en un Motor para Inspeccionarlo. Adaptado de (Pratt & Whitney, 2019)

Una vez ubicada la cámara se procede a capturar la imagen para el análisis respectivo.

## Capítulo 3

### PROPUESTA DE DISEÑO MECATRÓNICO

En el presente capítulo se procederá a hacer el diseño del sistema mecatrónico para poder diseñar un boroscopio que será la propuesta de solución final que en conjunto con el procesamiento de imágenes podrá brindar una buena alternativa frente a las tecnologías comerciales cuyo costo es mucho más caro.

#### 3.1 Metodología de diseño

Para el presente trabajo se emplea el estándar VID 2221. Este estándar es una metodología alemana que nos brinda los pasos asociados para poder realizar el diseño de un sistema mecatrónico que en este caso será el boroscopio propuesto.

El proceso generalizado de esta metodología comprende se muestra en la figura 22.

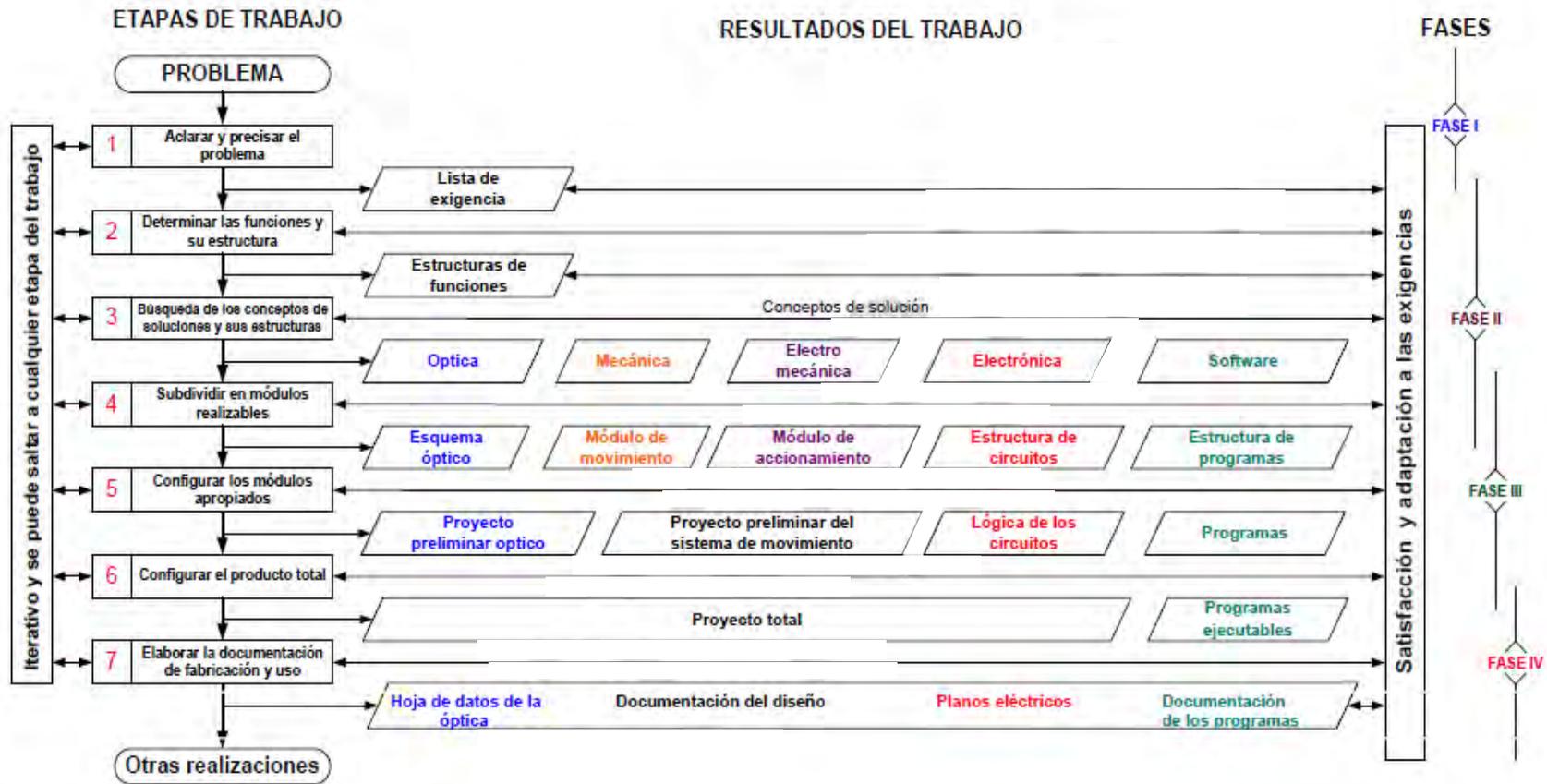


Figura 23. Proceso Generalizado de Desarrollo y Diseño de Sistemas Mecatrónicos. Adaptado de los Apuntes del Curso MTR605, PUCP 2018

### 3.1.1. Lista de Exigencias

De acuerdo a la metodología VID 2221 se procedió a elaborar la lista de exigencias de en donde se puede apreciar los requerimientos generales que deberá tener el sistema de inspección boroscópica propuesta. La matriz de la figura 24 indican estos requerimientos generales.

<b>LISTA DE EXIGENCIAS PARA EL DISEÑO DE UN EQUIPO DE BOROSCOPIA</b>		
<b>PROYECTO:</b>	BOROSCOPIO PARA TURBINAS A GAS	
<b>CLIENTE:</b>	OPERADORES DE TURBINAS A GAS, CATEGORÍA PEQUEÑA	
<b>CRITERIO</b>	<b>DESEO (D) / EXIGENCIA (E)</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
FUNCIÓN	E	El boroscopio deberá poder ingresar por una apertura pequeña para poder inspeccionar visualmente los componentes internos de la turbina de gas.
GEOMETRÍA	E	Deberá tener una sonda de diámetro no mayor a 4.5 mm y al menos de un metro de largo con tip o punta orientable para guiar la cámara.
CINEMATICA	E	La punta de la sonda debe poder girar 120° de su posición inicial al menos
FUERZAS	E	El sistema podrá orientar la punta de la sonda de manera manual por lo que debe resistir la fuerza de una persona normal.
ENERGÍA	E	Se deberá emplear una batería de entre 12 y 18 VDC portátil, esta deberá ser recargable.
MATERIALES	E	La sonda debe ser flexible, metálico y resistente a una temperatura de trabajo de entre 20 y 80 °C.
SEÑALES	E	Entradas: La cámara enfocará los componentes internos de la turbina para que el operador del boroscopio pueda detectar fallas o defectos internos.
SEÑALES	E	Salidas: imágenes de componentes internos para poder procesarlas en un ordenador.
SEGURIDAD	E	El sistema debe asegurarse de que no se desprenda ninguna parte del equipo dentro de la turbina ya que un elemento extraño podría causar serios daños a la turbina.
SEGURIDAD	D	Que el boroscopio disponga de algún sistema de protección IP para poder trabajar en lluvias ligeras.
ERGONOMIA	E	El mando o joystick de la punta de la sonda deberá de ser lo más ergonómica posible para poder trabajar por horas con el equipo.
FABRICACIÓN	E	Todas las partes que ingresan a la turbina deberán poder soportar la temperatura de operación (entre 20 y 80°C).
CALIDAD	E	La calidad de imágenes obtenidas del boroscopio determinará la mejor calidad de diagnóstico.
MONTAJE	E	Montaje compacto
TRANSPORTE	E	Se debe transportar todo el equipo en una maleta portátil
FUNCIÓN	E	Tener un buen funcionamiento en zonas de acceso muy pequeño y lograr la mejor calidad de video / imagen posible.
MANTENIMIENTO	D	Tendrá un plan de mantenimiento elaborado para mantener el equipo en la mejor condición posible. Se debe tener instrucciones claras para la calibración de la cámara.
COSTOS	E	El costo del equipo diseñado no deberá exceder los \$10,000.
ELECTRÓNICA	E	Se empleará una videocámara cuyos lentes sean adaptables a la sonda.
COMUNICACIONES	E	Se debe poder conectar el boroscopio a una PC a través de una conexión USB o similar

Figura 24. Lista de Exigencias para el Diseño del Equipo Boroscópico

### 3.1.2. Estructura de Funciones

Esta etapa nos ayuda a conceptualizar el problema de la captación de imágenes en las zonas de difícil acceso dentro de la turbina de gas como una secuencia de fases o etapas: Preparación, ejecución, control y fase final.

#### 3.1.2.1. Preparación

Comprende las siguientes sub-etapas:

- Retiro de su estuche
- Armado y encendido para probar su funcionamiento en una superficie plana, de preferencia una mesa de trabajo.

#### 3.1.2.2. Ejecución

- Inserción de la sonda en la turbina.
- Posicionamiento de la cámara en la zona de trabajo.
- Giro del eje de la turbina para proceder a captar la imagen.

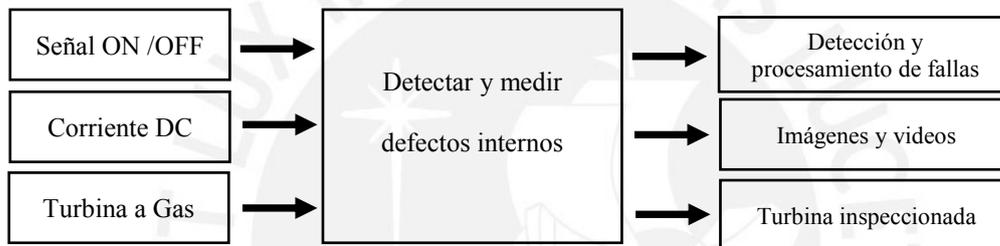
#### 3.1.2.3. Control

Enfoque de la cámara a través del joystick para obtener las mejores fotografías.

### 3.1.2.4. Fase final:

- Retiro de la sonda de la parte interna de la turbina.
- Transferencia de las imágenes adquiridas para su análisis.

Luego de haber presentado la secuencia de operación y funciones, se procederá a obtener la abstracción del modelo mostrado en a figura 25.



*Figura 25.* Caja Negra del Diseño del Boroscopio. Adaptado de los Apuntes del Curso MTR605, PUCP 2018

Una vez apreciadas la estructura de funciones se puede esquematizar la secuencia de la operación del equipo como se muestra en la figura 26.



*Figura 26.* Funcionamiento en etapas de la operación del equipo boroscópico.

Se puede apreciar que el equipo a diseñar tiene una interrelación entre el dominio mecánico, eléctrico-electrónico, software y el visual principalmente. Para el dominio de visualización elaboramos la estructura que se simplifica en la figura 27.

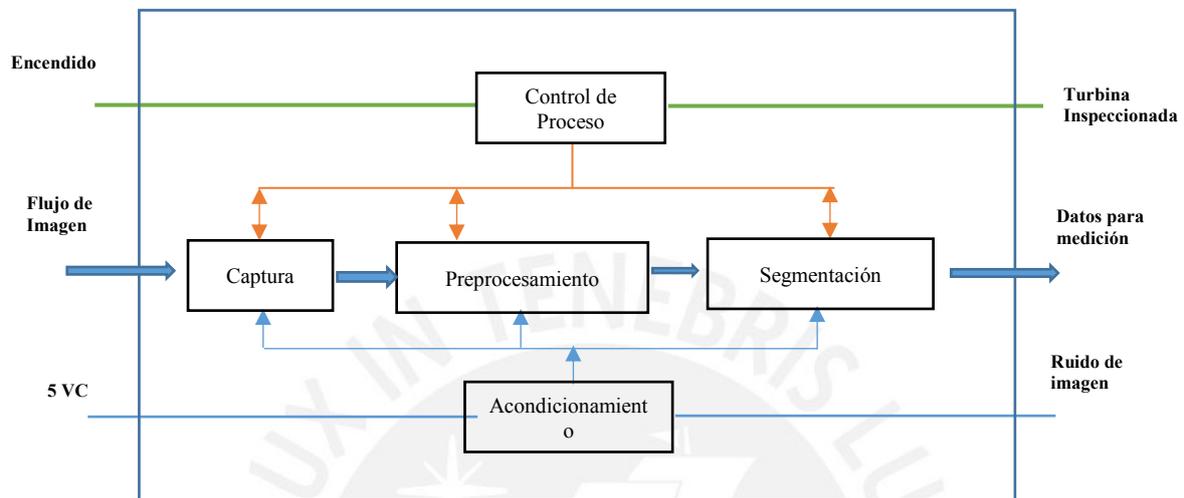


Figura 27. Estructura de funciones del dominio de la visión por computadora.

En la Figura 28, se procede a mostrar las otras estructuras de funciones y su relación dentro de los dominios mecánico, electromecánico y de software.

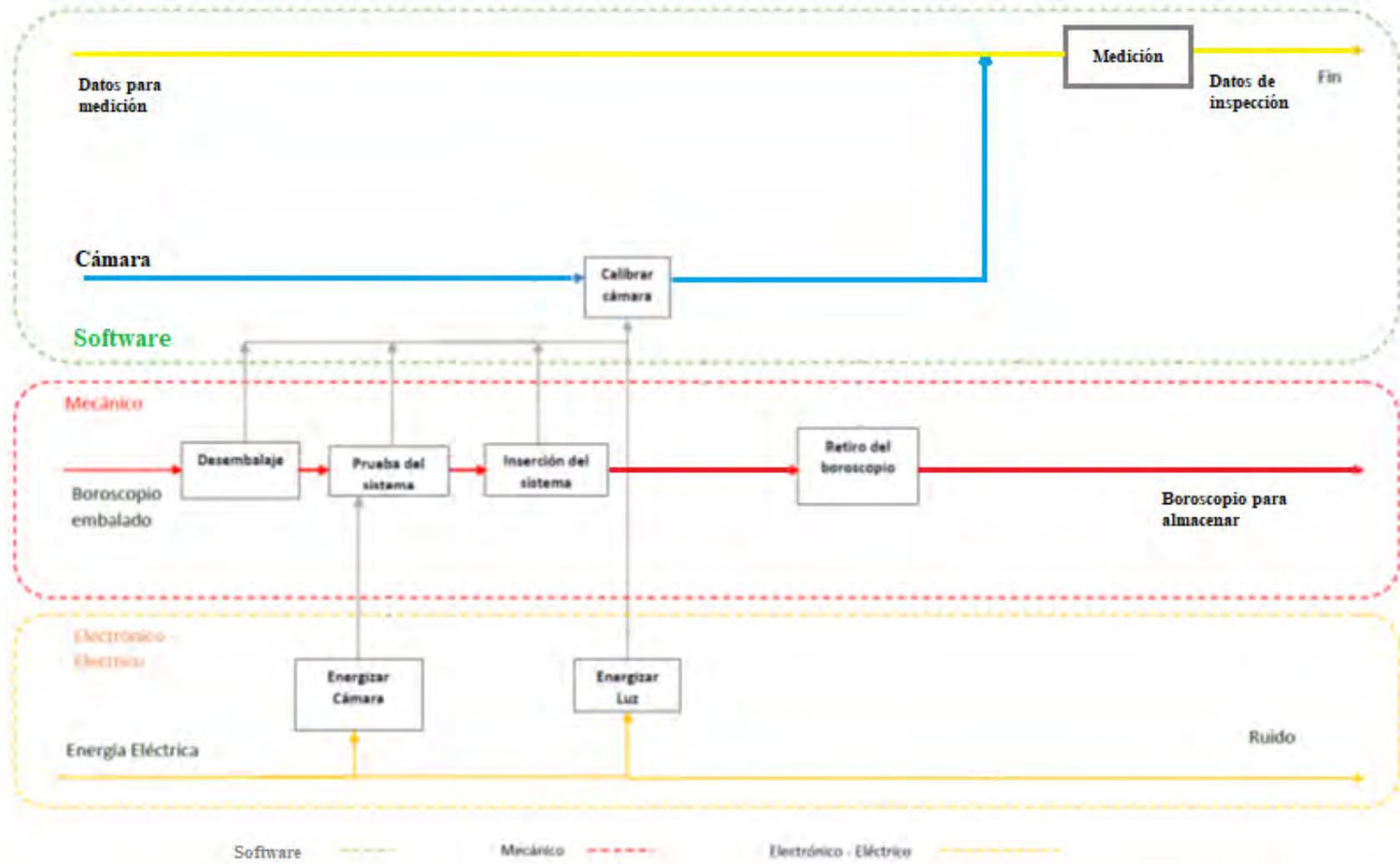


Figura 28. Interacción de los Dominios de Diseño del Boroscopio

### 3.1.3. Concepto de Solución

Para desarrollar el concepto de solución se hace uso de la matriz morfológica, se juntan los dominios mecánico y eléctrico para hacer el análisis en una única matriz y también se juntan los dominios de visión y software como segundo dominio a analizar. En la figura 29 se muestra la matriz del dominio mecánico eléctrico en donde se muestra la combinación para obtener los conceptos para la solución.

DOMINIO MECÁNICO / ELÉCTRICO			
Funciones	1 S1	2 S2	3
Almacenamiento y Protección del Equipo	Maletín Plástico con Espuma Antideformable 	Maletín Metálico 	Maletín de Tela Reforzada 
Alimentación del sistema	Batería de ión litio 	Fuente de Poder 	Alimentación USB 2.0 
Ingreso por Agujero Pre Determinado para Inspección Boroscópica	Sonda Flexible 	Sonda Rígida 	Sonda Flexible Dirigible 
Control de la punta o tip de la sonda	Control manual de 1° de libertad 	Control manual de 2° de libertad 	Control electrónico con 2° de libertad 

Figura 29. Matriz Morfológica del Dominio Mecánico-Eléctrico

En la figura 30 se aprecia las combinaciones para los conceptos de la solución de visión y software.

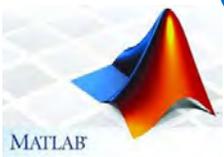
DOMINIO DE VISIÓN / SOFTWARE						
Funciones	1	S1	2	3	S2	
	Mini Videocámara Para Captura y Grabación de imágenes	Cámara tipo tubo con USB 2.0		Cámara tipo tubo con Micro USB		Cámara tipo tablero con LED
USB 2.0			USB 3.0		TCP/IP	
Comunicación	PC		Lap Top		Rasperry PI	
	MatLab		Python Open CV		LabView	

Figura 30. Matriz Morfológica del Dominio Visión-Software

Como paso siguiente para conseguir la solución óptima se procede a hacer una evaluación y una verificación que incluyen aspectos técnicos y económicos. Entre los aspectos técnicos se

consideran los siguientes: Eficiencia (Buen uso de la fuerza o energía), seguridad, rapidez, estabilidad, rigidez, manipulación, confiabilidad, facilidad de manejo, transportabilidad, complejidad y posibilidad de automatización.

En el caso de los aspectos económicos se consideran los siguientes: Número de piezas, disponibilidad de materiales de fabricación, costo de la tecnología, facilidad de montaje o ensamble, fácil mantenimiento, costos de operación.

#### **3.1.4. Proyecto Preliminar**

Ahora se procederá a elaborar un proyecto final que a partir de las características técnicas económicas definidas en la sección anterior para obtener un modelo que se aproxime al diseño final. En esta etapa también se construyen los cálculos principales del diseño, los cuales nos permitirán justificar la elección de los elementos del equipo diseñado.

De acuerdo con las recomendaciones de la norma VDI 2225 se establecen los criterios de evaluación técnico-económicos.

La evaluación del valor técnico se puede apreciar en la figura 31 en la que la solución 1 tiene un porcentaje ( $X_i$ ) mayor a 0.6, mostrándose como mejor alternativa para el dominio mecánico – eléctrico mientras que la solución 2 presenta un mejor resultado en el dominio de visión y software.

MATRÍZ DE EVALUACIÓN TÉCNICA														
Valor Técnico (Xi)														
Proyecto: Boroscopio para Turbinas a Gas														
N°	Criterios técnicos y económicos	Peso	Dominio Mecánico - Eléctrico						Dominio Visión - Software					
			S1		S2		Solución ideal		S1		S2		Solución ideal	
Aspectos técnicos			g	p	pg	p	pg	p	pg	p	pg	p	pg	
1	Eficiencia (Buen uso de la fuerza o energía)	12.50	3	37.5	2	25	4	50	3	37.5	2	25	4	50
2	Seguridad	12.50	3	37.5	1	12.5	4	50	2	25	3	37.5	4	50
3	Rapidez	9.38	3	28.13	2	18.75	4	37.5	3	28.13	3	28.13	4	37.5
4	Estabilidad	9.38	2	18.75	2	18.75	4	37.5	2	18.75	3	28.13	4	37.5
5	Rigidez	6.25	3	18.75	2	12.5	4	25	3	18.75	2	12.5	4	25
6	Manipulación	12.50	3	37.5	2	25	4	50	1	12.5	3	37.5	4	50
7	Confiabilidad	15.63	3	46.88	2	31.25	4	62.5	2	31.25	3	46.88	4	62.5
8	Transportabilidad	9.38	3	28.13	3	28.13	4	37.5	3	28.13	2	18.75	4	37.5
9	Complejidad	6.25	3	18.75	2	12.5	4	25	2	12.5	2	12.5	4	25
10	Posibilidad de automatización	6.25	1	6.25	3	18.75	4	25	2	12.5	1	6.25	4	25
Puntaje máximo $\Sigma g$ o $\Sigma gp$		100	27	278.1	21	203.1	40	400	23	225	24	253.1	40	400
Valor Técnico Xi			0.68		0.53		1		0.58		0.60		1	
Orden														

**Leyenda:**

- 0: No satisface
- 1: Apenas aceptable
- 2: Suficiente
- 3: Bien
- 4: Muy Bien

Figura 31. Matriz de evaluación técnica de los dominios Mecánico – Eléctrico y Visión Software.

Por otro lado, la figura 32 muestra la matriz de evaluación económica de los dominios mencionados, en este caso se ratifica los resultados de la matriz de evaluación de los criterios técnicos dando a elegir la solución 1 en el dominio mecánico eléctrico y la solución 2 en el dominio de visión y software.

MATRÍZ DE EVALUACIÓN ECONÓMICA														
Valor Económico (Yi)														
Proyecto: Boroscopio para Turbinas a Gas														
N°	Criterios técnicos y económicos	Peso	Dominio Mecánico - Eléctrico						Dominio Visión - Software					
			S1		S2		Solución ideal		S1		S2		Solución ideal	
Aspectos Económicos			g	p	pg	p	pg	p	pg	p	pg	p	pg	
1	Número de piezas	9.09	3	27.27	2	18.18	4	36.36	3	27.27	3	27.27	4	36.36
2	Disponibilidad de materiales de fabricación	18.18	3	54.55	2	36.36	4	72.73	2	36.36	3	54.55	4	72.73
3	Costo de la tecnología	22.73	4	90.91	2	45.45	4	90.91	3	68.18	2	45.45	4	90.91
4	Facilidad de montaje o ensamble	13.64	2	27.27	2	27.27	4	54.55	1	13.64	3	40.91	4	54.55
5	Fácil mantenimiento	13.64	2	27.27	2	27.27	4	54.55	1	13.64	2	27.27	4	54.55
6	Costos de operación	22.73	3	68.18	1	22.73	4	90.91	2	45.45	3	68.18	4	90.91
Puntaje máximo $\Sigma g$ o $\Sigma gp$		100	17	295.5	11	177.3	24	400	12	204.5	16	263.6	24	400
Valor Económico Yi			0.71		0.46		1		0.50		0.67		1	
Orden														

**Leyenda:**

- 0: No satisface
- 1: Apenas aceptable
- 2: Suficiente
- 3: Bien
- 4: Muy Bien

*Figura 32.* Matriz de evaluación económica de los dominios Mecánico – Eléctrico y Visión Software.

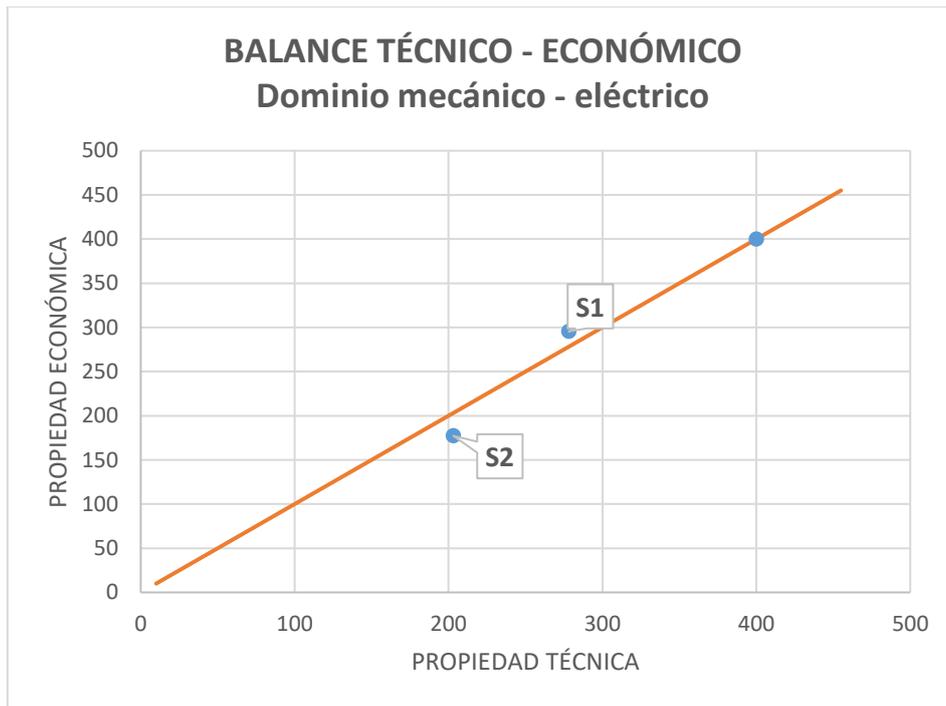
De las matrices de evaluación se puede verificar que se han homogenizado los datos para poder tener el mismo valor de puntaje ideal de las soluciones postoras. Luego se procede a evaluar la alternativa que mejor balance técnico económico tiene, pudiéndose ver estos datos tabulados en la tabla 5. A continuación en las figuras 33 y 34 se muestran los balances técnico económicos de los dominios evaluados con los datos de la tabla 5.

*Tabla 5*

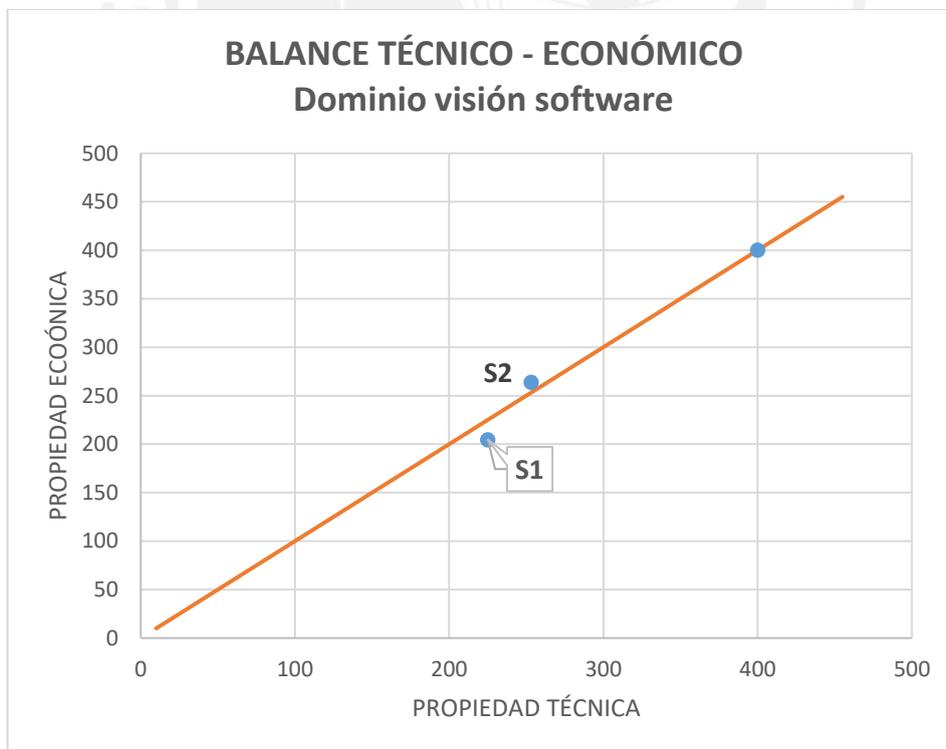
Técnicas Empleadas en Monitoreos Fuera de Línea para Turbinas a Gas

<b>Solución</b>	<b>Dom. Mec.-Eléc</b>	<b>Dom. Mec.-Eléc</b>	<b>Dom. Vis.-Soft</b>	<b>Dom. Vis.-Soft</b>
	<b>(P. Técnica)</b>	<b>(P. Económica)</b>	<b>(P. Técnica)</b>	<b>(P. Económica)</b>
S1	278	295	225	205
S2	203	177	253	264
S. Ideal	400	400	400	400

Nota. Elaboración propia.



*Figura 33.* Balance Técnico Económico de las Soluciones 1 y 2 en el dominio mecánico – eléctrico.



*Figura 34.* Balance Técnico Económico de las Soluciones 1 y 2 en el dominio visión - software.

### 3.1.4.1. Comprensión del dominio mecánico - eléctrico

De acuerdo a la norma A-A-59883 del departamento de defensa de los Estados Unidos de Norte América, ciertos requerimientos se deben considerar para poder hacer el diseño de un Boroscopio, Dichos requerimientos serán considerados al momento de hacer la adquisición de componentes mecánicos eléctricos:

- MATERIALES DE CONTRUCCIÓN: Se deben emplear materiales de preferencia reciclables.
- DIAMETRO DE LA SONDA: Para un boroscopio de 4 mm, el diámetro externo no deberá exceder los 4.1 mm.
- CONSTRUCCIÓN DE LA SONDA: La sonda se debe construir empleando materiales multicapa que ofrecen mantener la flexibilidad para su maniobrabilidad por los componentes internos de las turbinas.
- ARTICULACIÓN: La articulación debe tener al menos 4 direcciones (arriba-abajo, derecha-izquierda), con un ángulo no menor de doblaje de 120°.
- LUZ: La fuente de luz debe ser de LED.
- MEMORIA: Debe tener una memoria capaz de almacenar al menos 20 fotos con al menos una resolución de 680x480 píxeles y debe ser capaz de transferir dichos archivos por un dispositivo que esté disponible comercialmente.
- SOFTWARE DE MEDICIÓN INTERNA: El Boroscopio debe tener un software de medición interna que pueda medir de manera precisa y confiable varios tipos de defectos a través del motor.
- CONTROLES DEL BOROSCOPIO: Debe ser dotado con controles fáciles de usar para poder operar el equipo.

- LECTOR USB: Debe contar con un lector de USB que permita transferir datos a una PC.
- TEMPERATURA DE OPERACIÓN: La temperatura mínima de operación es de  $-25^{\circ}\text{C}$  y la máxima  $80^{\circ}\text{C}$ .

Se puede apreciar que se han considerado estos requerimientos para poder hacer el diseño preliminar. En secciones posteriores se procederá a demostrar la adecuada selección de los elementos claves para el procesamiento de imágenes.

#### **3.1.4.2. Selección de la cámara**

Respecto al requerimiento de las cámaras, la norma A-A-59883 señala los siguientes requerimientos:

- RESOLUCIÓN DE LA CÁMARA: La cámara no debe tener una resolución menor a 250,000 píxeles y un factor de 1/10.
- CAMPO DE VISIÓN: Debe tener un campo de visión (field of view) no menor a  $80^{\circ}$ .

Al saber que tenemos álabes cuya dimensión aproximada, de acuerdo a los parámetros de la ficha técnica del fabricante, nos gustaría saber la distancia de trabajo a la que debe estar la cámara como máximo para detectar alguna falla en el sistema, Por ejemplo, si seleccionamos una cámara modelo MD-B17204 de la marca MISUMI, con las siguientes características técnicas: Diámetro 4mm, tamaño de píxeles de  $2.125 \times 2.125 \text{ um}$ , resolución de  $640 \times 480$ , sensor de  $1/10''$  y un FOV de  $87^{\circ}$  y DOF de 60 mm. Esto quiere decir que se podría capturar un objeto con una dimensión de  $40 \times 40 \text{ mm}$  hasta en un máximo de 21.076 mm de distancia de trabajo de acuerdo a la geometría de la cámara mostrada en la figura 35.

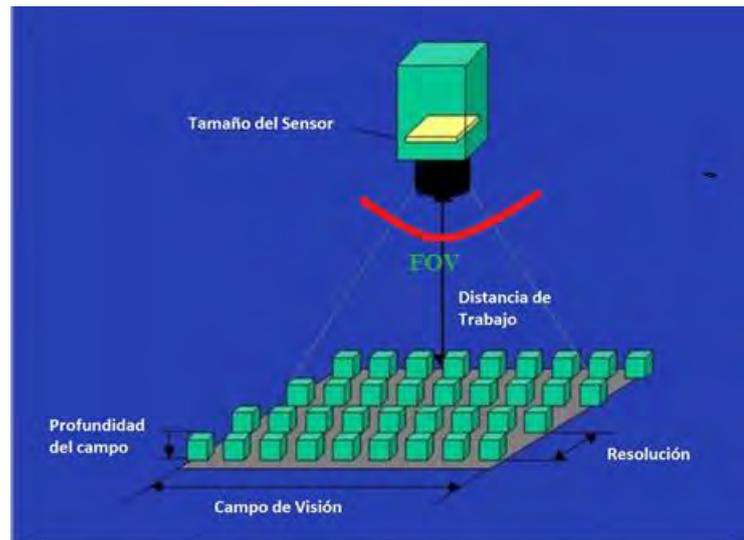


Figura 35. Parámetros básicos de una cámara, Recuperado de <https://www.ni.com/es-cr/>.

### 3.1.4.3. Selección de la iluminación

La iluminación es uno de los elementos claves del acondicionamiento de la imagen para iniciar su procesamiento. El objetivo es poder calcular la luminosidad necesaria de la fuente de luz para poder obtener una buena captura de imágenes, en este caso se eligen LEDs, como lo semana la norma A-A-59883. Se emplea la luz blanca. De los parámetros del fabricante tenemos los siguientes datos: FOV de 87° y DOF de 60 mm. De acuerdo a la norma alemana de normas técnicas para lugares de trabajo empleadas por (Valdivia Arias, 2016), para los lugares de trabajos en los que se hace actividad de manera remota, basta con una luminosidad de 50lx y en caso se requiera una intervención manual en un proceso de ingeniería se debe tener una luminosidad de hasta 150lx. Para el caso el autor recomienda la luminosidad recomendada para actividades de Inspección de color (1000lx). Las fórmulas empleadas para determinar la cantidad de luminosidad son las que se muestran a continuación:

Fórmula para determinar el ángulo sólido:

$$\Omega_1 = 2\pi(1 - \cos\gamma_1)\Omega_0 \dots (11)$$

Fórmula para la intensidad de la luminosidad:

$$I = \frac{Er^2}{\Omega_0\gamma_1\cos(\gamma_2)} \dots (12)$$

Fórmula para encontrar la cantidad de luminosidad:

$$\Phi = I\Omega_1 \dots (13)$$

De los datos de la cámara se tiene que  $\gamma_1 = 87^\circ/2$ ,  $\gamma_2 = 0^\circ$  se considera que el plano objeto es perpendicular al haz de luz en el eje focal y r es la distancia de trabajo máxima (DOF) y  $E = 1000\text{lux}$ . En tal sentido se tiene que a la distancia r (60 mm) se requerirá 14.9lx de la fuente. De acuerdo al datasheet del LED EDI-CSP061801 para minicámaras de la empresa MISUMI, estos garantizan una iluminación de 3lx por lo que se requerirán al menos 5 LEDs incorporados en la cámara para garantizar una buena iluminación.

## Capítulo 4

### RESULTADOS EXPERIMENTALES

#### 4.1. Diseño de la toma de muestra:

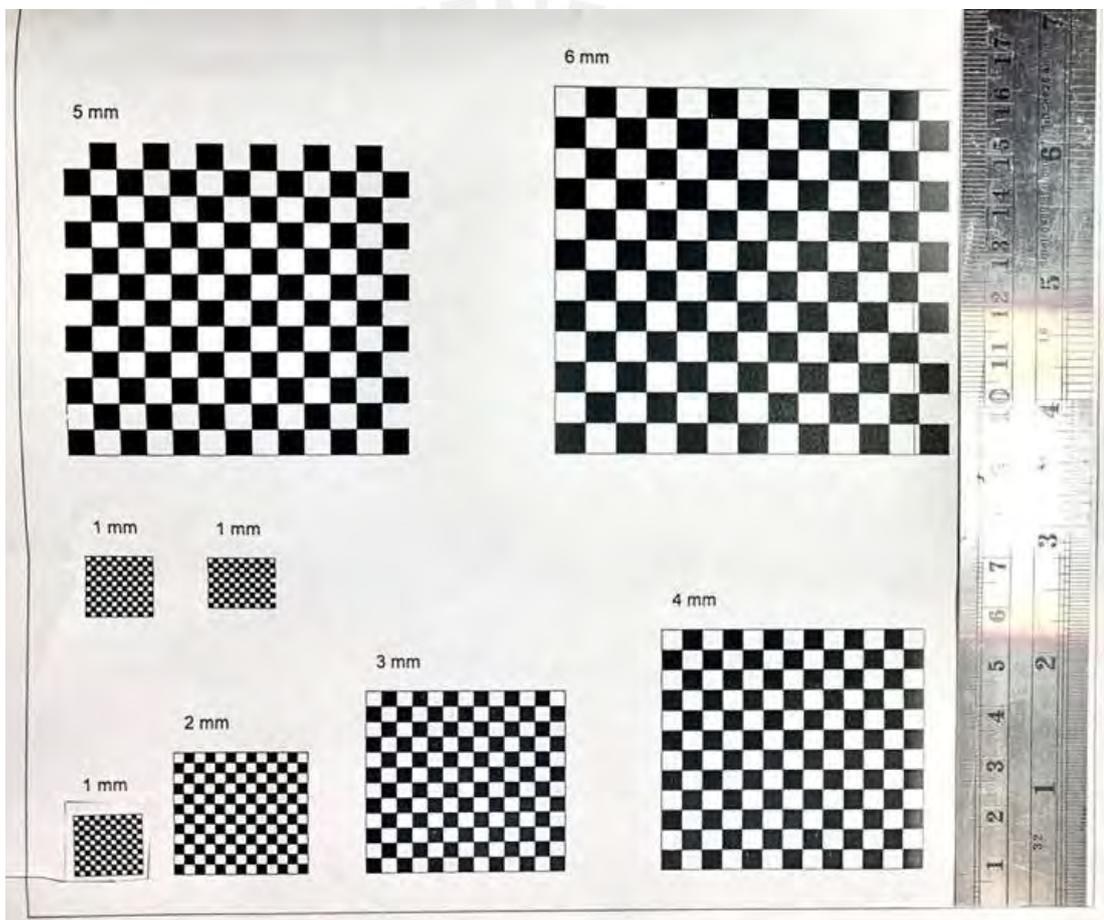
Para poder hacer la toma de la muestra de la imagen se procedió a fabricar los patrones de calibración empleando el programa de diseño computacional AutoCAD. Se formaron cuadrículas similares a las de un tablero de ajedrez como muestra la figura 36. Los patrones de muestra tienen medidas de 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm y 5 mm.

Dado que el tamaño de los álabes usados como modelo experimental (motor PT6) son de un tamaño reducido, se empleó el patrón más reducido (1 mm) inicialmente para poder hacer las pruebas experimentales. Luego se emplearon gradualmente los siguientes patrones considerando que más adelante se podría emplear para medir defectos en turbinas de aeronaves de mayor tamaño, seguidamente se hizo la prueba de precisión de las medidas empleando una base de datos en la que se consideraron las siguientes variables:

- Ángulo de incidencia de la cámara hacia el plano del patrón de calibración.

- Medidas objetivo (medidas estándares de 1 a 10 mm para comparar el resultado).
- Medida obtenida con el videoscopio propuesto.
- Error teórico.

Al final de la colección de datos se evaluará la desviación estándar de los datos obtenidos para evaluar los resultados.

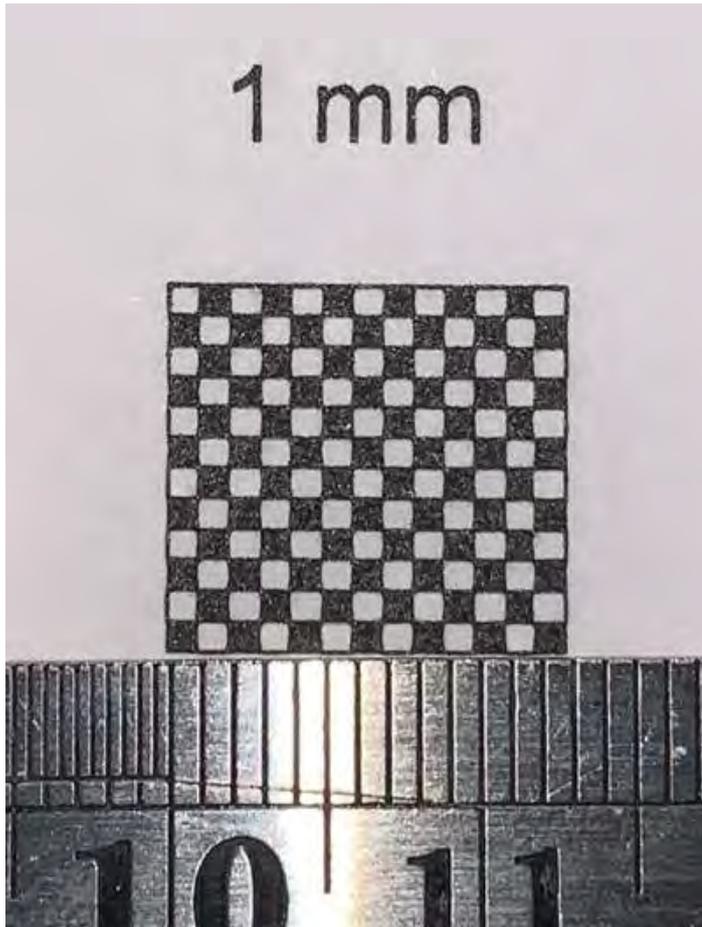


*Figura 36.* Diseño de las Cuadrículas de Calibración a partir de AutoCAD.  
Elaboración propia

En las siguientes secciones se describe los pasos realizados durante la experimentación con los diferentes tamaños de patrones empleados.

#### 4.2. Experimento con un Patrón de 1 mm

Luego de imprimir (plotear) los patrones seleccionados, se procedió a hacer una verificación de las medidas, en la figura 37 podemos apreciar la medición de las cuadrículas de del patrón de 1 mm con una regla metálica.

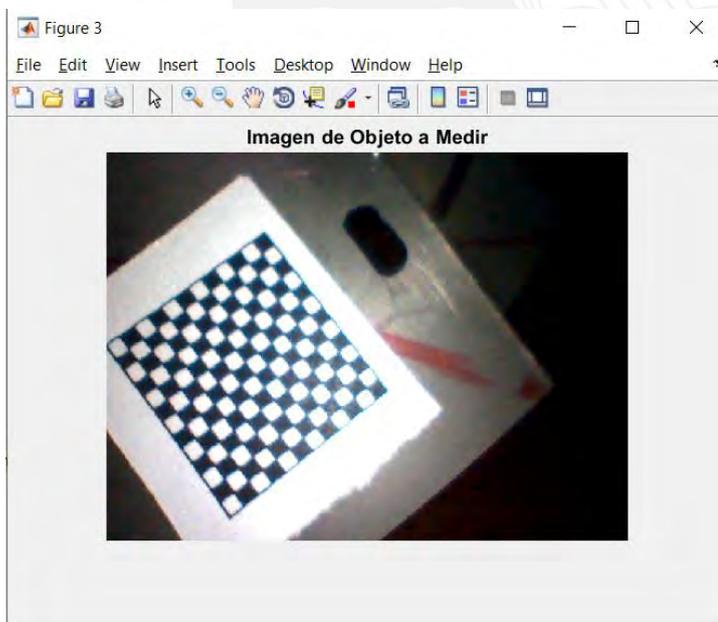


*Figura 37.* Patrón de Calibración de 1 mm. Elaboración Propia

A continuación, se muestra en la figura 28 la manera de distribuir los patrones y las marcas de referencia con un plumón indeleble, los cuales simulan una falla dentro del componente.

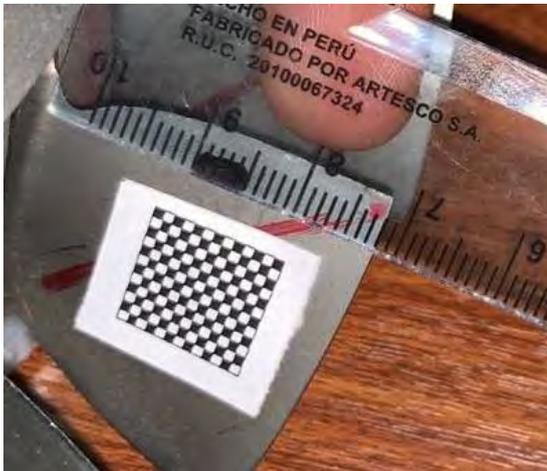


*Figura 38.* Procedimiento de Calibración para Medición en las Veletas del Compresor. Elaboración propia.



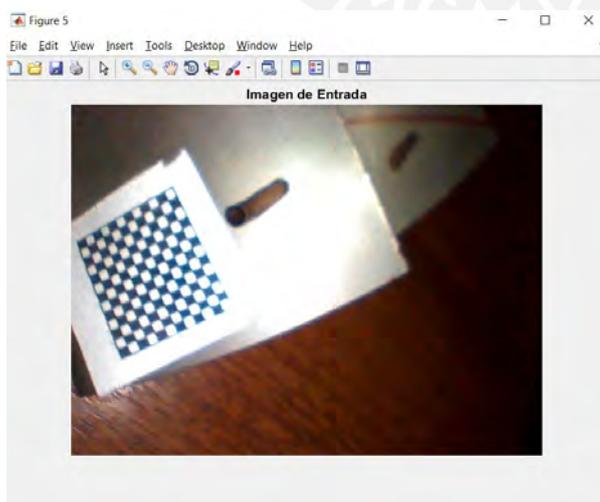
*Figura 39.* Segundo experimento con la medición (resultado 5.25 mm). Elaboración Propia

Posteriormente se aplicó el algoritmo de medición de distancias (Anexo 4), obteniéndose los siguientes resultados una medición de 5.25 mm (figura 29) para una medida real de 5 mm medido con una regla (figura 30).



*Figura 40.* Medición de la Dimensión Real del Defecto Simulado.

La segunda medición hecha corresponde a un segundo defecto simulado, en este caso corresponde a una falla de poco más de 6 mm, en la figura 41 se aprecia el resultado con el programa propuesto y en la figura 32 la medición del defecto real.



*Figura 41.* Medición del Segundo Defecto Simulado Usando el Programa Propuesto (Medida = 6.28 mm)



*Figura 42. Medición de la Dimensión Real del Segundo Defecto Simulado.*

#### **4.3. Experimento con un Patrón de 2 mm**

Para este caso se tomaron diferentes ángulos para la toma de las muestras, en la figura 43 se muestra la verificación de las cuadrículas con un instrumento más sofisticado.



*Figura 43. Patrón de Calibración de 2 mm. Elaboración Propia*

Primero se hizo la captura de los patrones de calibración con un ángulo de  $30^\circ$  (figura 44):

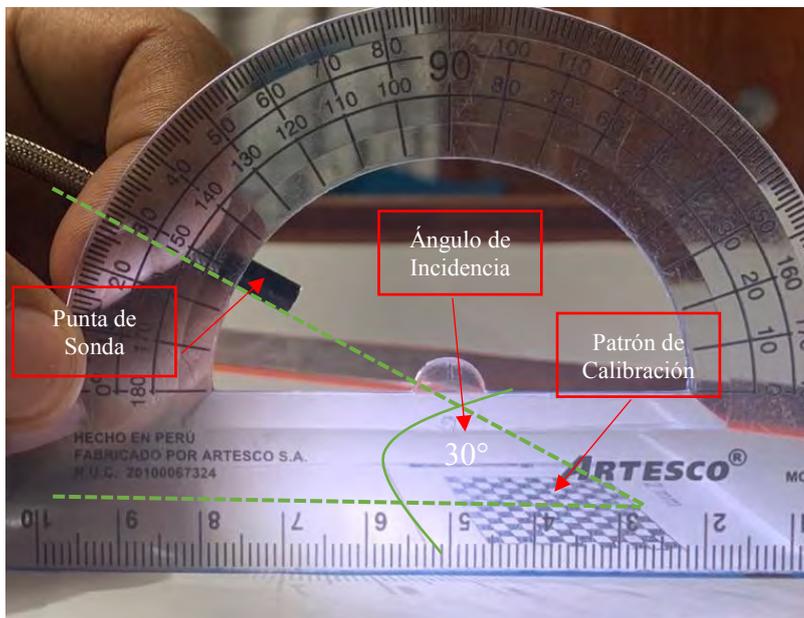


Figura 44. Toma de Los Patrones de Calibración con un ángulo de  $30^\circ$ . Elaboración Propia.

Obteniéndose como resultado una medida de 3.78 mm como lo muestra la figura 45, y en la figura 46 se muestra cómo se selecciona los puntos en la imagen.

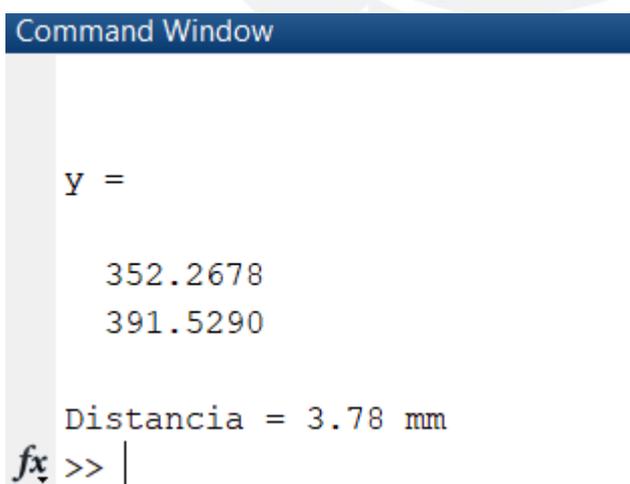


Figura 45. Resultado de la Primera Medición con Patrón Calibrado con un Ángulo de inclinación de  $30^\circ$ . Elaboración Propia.



Figura 46. Medición de la Distancia Entre Dos Cuadrículas con un Ángulo de  $30^\circ$ .  
Elaboración propia.

Posteriormente, empleando el mismo patrón de calibración de 2 mm se repitió el experimento, pero en esta ocasión con un ángulo de incidencia de  $60^\circ$ . La figura 47 muestra el procedimiento de ajuste del ángulo de incidencia de la cámara respecto al plano del patrón.



Figura 47. Toma de Muestras Para la Calibración Con un Ángulo de incidencia de  $60^\circ$ . Imagen tomada con la APP Protactor. Elaboración Propia.

El resultado obtenido fue de 3.93 mm.

#### 4.4. Evaluación de la Precisión de las Mediciones

Para poder cuantificar los errores se diseñó un experimento de manera secuencial de acuerdo a los pasos descritos en los ejemplos de las secciones 4.3 y 4.4. En el Anexo 5 se muestra el cuadro de un total 500 mediciones que se hicieron utilizando patrones de calibración desde 1 hasta 5mm, se emplearon también 10 ángulos de incidencia diferente ( $45^\circ$  a  $90^\circ$ ) y se simuló fallas con dimensiones que varían entre 1 mm hasta 10 mm. La construcción de las fallas simuladas se hizo de manera manual y con el apoyo de una regla de dibujo.

El primer factor a considerar para poder medir de manera cuantitativa es ver cuánto puede afectar el ángulo de incidencia al momento de hacer una medición. En la tabla 6 se puede apreciar el error promedio que se obtiene luego de las 10 medidas tomadas experimentalmente en objetivos reales de entre 1 y 10 mm, siendo la medida del valor objetivo la primera variable. La segunda variable que se tiene es el ángulo de incidencia entre la cámara y el plano del objetivo a medir, manteniendo como constante el patrón de calibración o tamaño de cuadrícula (tablero de ajedrez).

En el anexo 06 se puede apreciar la tabla de resultados de las mediciones variando el patrón de calibración y los ángulos de incidencia de la cámara al plano de las primeras.

Tabla 6

Desviación Estándar de las Medidas Obtenidas con el Sistema Propuesto. Patrón 1 mm

$\alpha^\circ$	$\bar{e}$	$\sigma$
90	-0.018	0.103
85	0.03	0.064
80	0.057	0.137
75	0.014	0.128
70	0.071	0.137
65	0.061	0.151
60	0.057	0.176
55	0.172	0.237
50	0.262	0.288
45	0.281	0.103

Nota. Elaboración propia.

En base a los datos de la tabla 6 también se elabora la figura 48 que grafica por cada ángulo de incidencia el error promedio (en %).

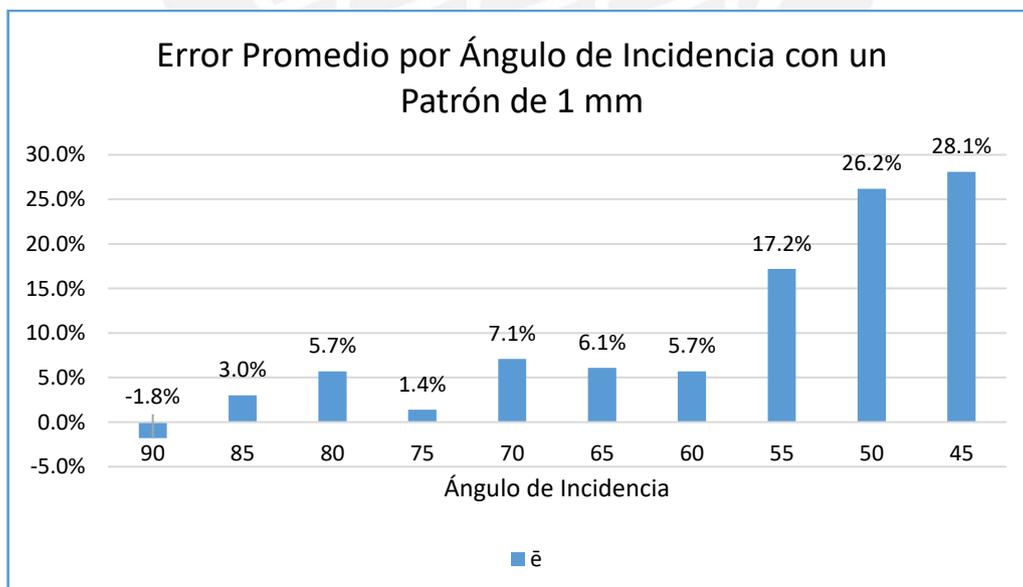


Figura 48. Error por ángulo de Incidencia con Medidas Tomadas con un Patrón de 1 mm. Elaboración propia.

Luego de los resultados mostrados en la sección anterior, se podría inferir que mientras el ángulo de incidencia sea más cercano a  $90^\circ$ , tendremos mejores resultados ya que los errores promedio de todas las mediciones tienden a ser menores. De la tabla 6 también se puede apreciar que mientras el ángulo de incidencia es mayor, los datos son menos dispersos o tienen una mejor desviación estándar. En este caso mientras más cercano a cero el error promedio de las mediciones y con una menor desviación estándar mejor será el resultado. En el anexo 6 se muestra la tabulación de estos mismos cálculos con los patrones de 2, 3, 4 y 5 mm.

Como segundo factor de evaluación, para poder cuantificar la eficiencia del sistema propuesto, se evalúa qué tan eficiente son los patrones empleados, para ello se mide el error promedio de las mediciones obtenidas con respecto al valor objetivo de medición teniendo como variable el ángulo de incidencia desde  $45^\circ$  a  $90^\circ$  (con incrementos de  $5^\circ$ ) pero empleando el mismo patrón o cuadrícula de calibración. En la tabla 7 se muestran los resultados para el patrón de 1 mm, incrementando el ángulo de incidencia en  $5^\circ$  desde los  $45^\circ$  hasta los  $90^\circ$ .

Tabla 7

Desviación Estándar de las Medidas Obtenidas con el Sistema Propuesto. Patrón 1 mm

Medida Objetivo	$\bar{e}$	$\sigma$
1 mm	0.036	0.030
2 mm	0.040	0.046
3 mm	-0.102	0.066
4 mm	-0.153	0.076
5 mm	0.004	0.062
6 mm	0.174	0.108
7 mm	0.270	0.102
8 mm	0.185	0.205
9 mm	0.178	0.202
10 mm	0.233	0.231

Nota. Elaboración propia.

Con los datos obtenidos de la tabla 7 se obtiene también la figura 49:

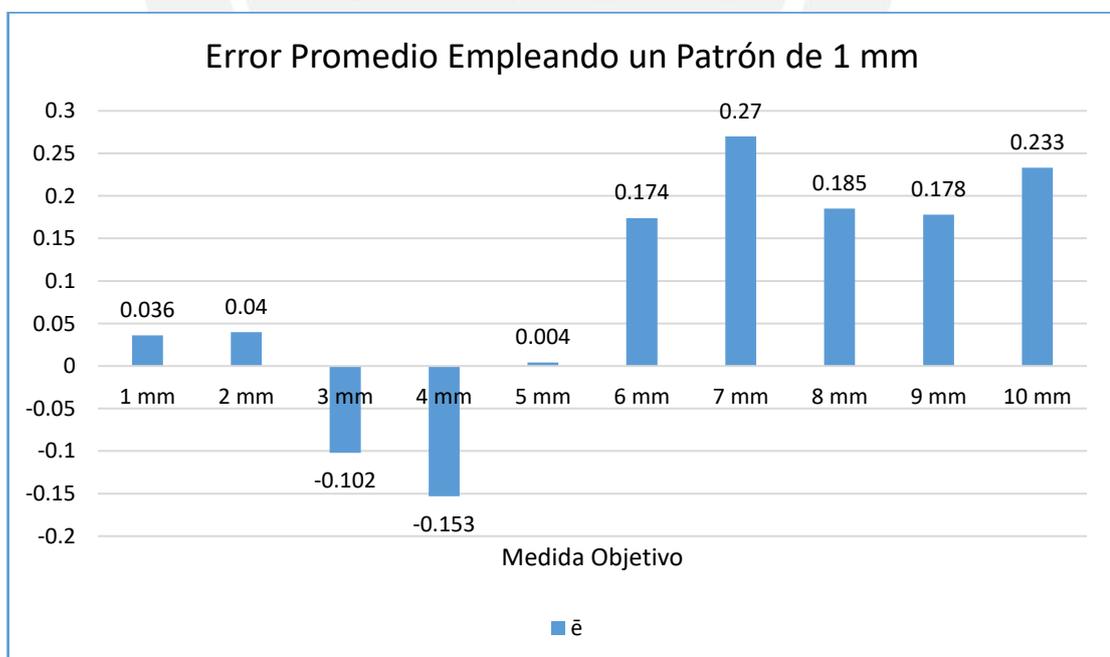


Figura 49. Error Promedio en las Medidas Objetivas al Emplear un Patrón de 1mm. Elaboración propia.

De la tabla 7 y el gráfico de la figura 49, se puede inferir que cuando se emplea un mismo patrón se puede obtener mejores mediciones para valores pequeños (1 a 5 mm) considerando también que la dispersión de los datos (desviación estándar) es baja hasta valores de 5 mm, sin importar mucho el valor del ángulo de incidencia. Estos resultados se obtuvieron empleando un patrón de calibración (tablero de ajedrez) de 1 mm, en el anexo 7 se muestran los resultados para patrones de calibración de 2, 3, 4 y 5 mm los cuales nos ayudarán a generalizar aún más estos primeros resultados.

Finalmente, se tiene el error promedio que se obtiene al comparar los valores obtenidos medidos con el programa propuesto cuando se tenía el mismo objetivo (medidas de 1 a 10 mm), variando el tamaño del patrón de 1 a 5 mm y los ángulos de incidencia entre el plano de la cámara y el plano del objeto a medir. La tabla 8 muestra los resultados obtenidos de los errores y su respectiva desviación estándar con respecto a un valor objetivo propuesto.

Tabla 8

Desviación Estándar de las Medidas Obtenidas con el Sistema Propuesto. Objetivo 1 mm

$\alpha$	$\bar{\epsilon}$	$\sigma$
45	-0.040	0.055
50	-0.036	0.115
55	-0.080	0.101
60	0.014	0.061
65	-0.002	0.048
70	-0.036	0.107
75	-0.028	0.051
80	0.028	0.034
85	-0.002	0.045
90	-0.020	0.027

Nota. Elaboración propia.

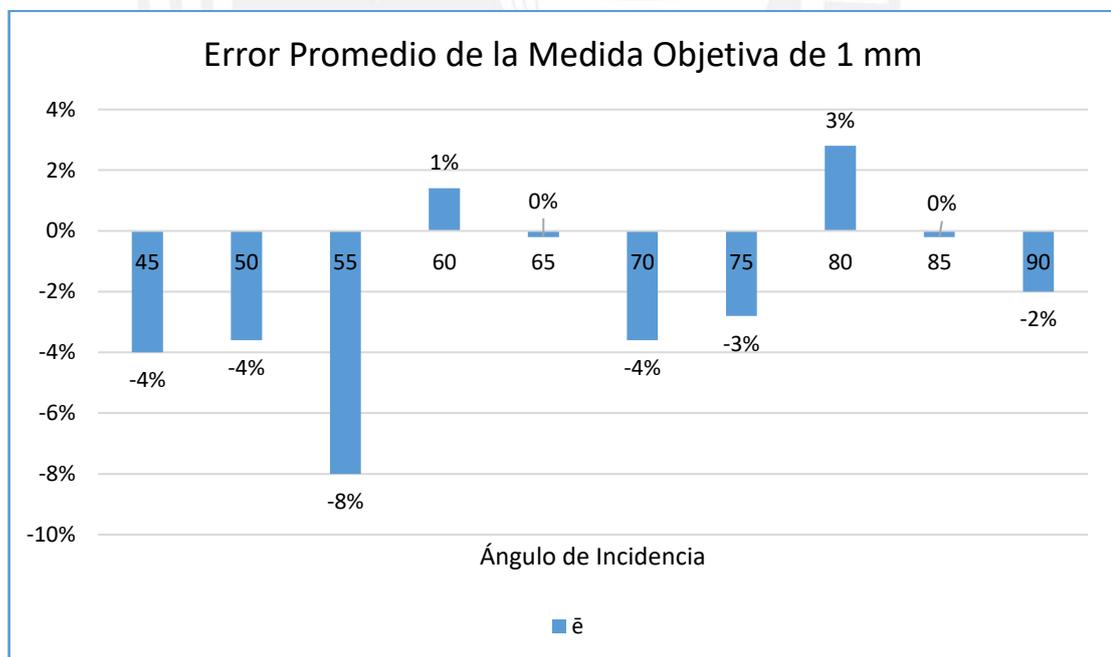


Figura 50. Error Promedio en las Medidas Objetivas Respecto al Ángulo de Incidencia Empleando Diversos Patrones de Calibración. Elaboración propia.

Los resultados de la tabla 8 nos muestran que los errores son diversos, así como las desviaciones estándar, por lo que no se puede llegar a distinguir un patrón de comportamiento para estos datos. En el anexo 8 se muestran los resultados para los valores objetivos de 2 hasta 10 mm.

#### **4.5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

Para poder discutir los resultados experimentales, se procede a analizar los resultados de los tres factores de eficiencia del sistema considerado: ángulo de incidencia, efecto del tamaño del patrón y por último ver la variabilidad entre las medidas obtenidas con el sistema propuesto.

El primer factor es el que concierne al ángulo de incidencia entre el plano del objeto y el plano de la cámara. De la tabla 7 de la sección 4.4, se puede apreciar que a menor ángulo de incidencia, mayor error en la medición, esto se puede apreciar que se cumple también para los demás valores tabulados (Anexo 6) en donde los patrones de 2, 3, 4 y 5 mm tienen la misma tendencia. Para poder encontrar una generalización se procede a cuantificar el error de todas las medidas tomadas por cada ángulo tomado, los cuales pueden apreciarse en la tabla 9, esta deducción se puede apreciar gráficamente en la figura 51, donde vemos que el promedio de errores es menor que el 2% para ángulos de incidencia mayor a  $75^\circ$  hasta  $90^\circ$ , y en la figura 52 en la que apreciamos que la desviación estándar para el rango de ángulos indicados es la menor de todo el grupo de ángulos de incidencia con los que se experimentamos.

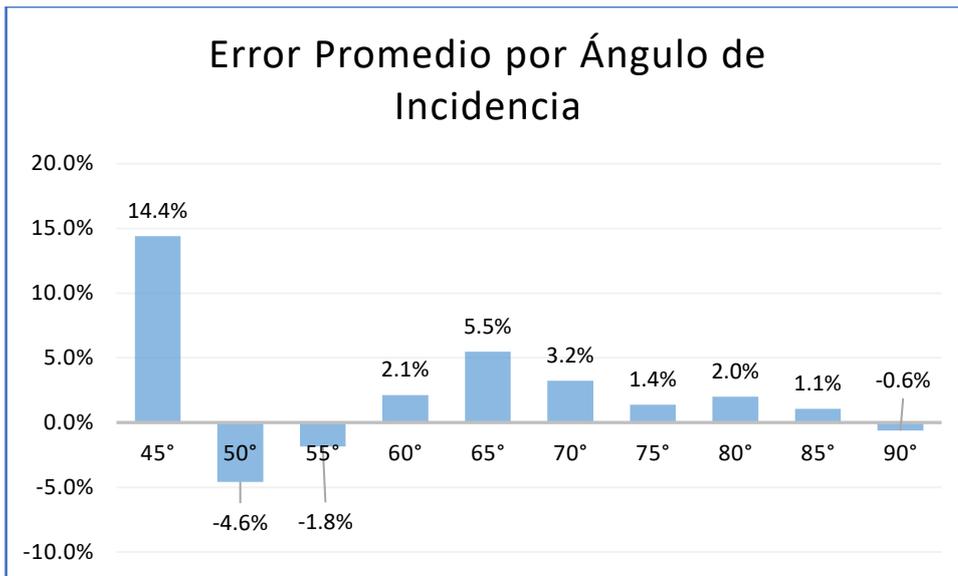
Tabla 9

Error Promedio Total de Todos los Ángulos y su Respectiva Desviación Estándar

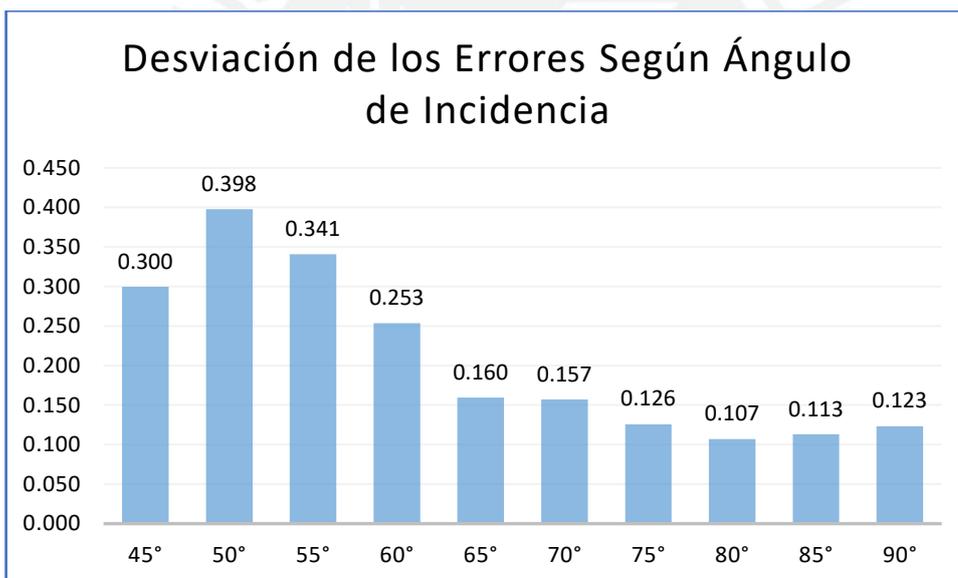
$\alpha$	$\bar{\epsilon}$ (%)	$\sigma$	$\epsilon_{\max}$	$\epsilon_{\min}$	$n\sigma$
45°	14.4%	0.300	1.150	-0.650	3.0
50°	-4.6%	0.398	0.710	-0.990	2.1
55°	-1.8%	0.341	0.460	-0.970	2.1
60°	2.1%	0.253	0.730	-0.530	2.5
65°	5.5%	0.160	0.440	-0.280	2.3
70°	3.2%	0.157	0.570	-0.230	2.5
75°	1.4%	0.126	0.300	-0.220	2.1
80°	2.0%	0.107	0.240	-0.180	2.0
85°	1.1%	0.113	0.340	-0.200	2.4
90°	-0.6%	0.123	0.270	-0.320	2.4

Nota. Elaboración propia.

“ $\epsilon_{\max}$ ” representa el error máximo y representa “ $\epsilon_{\min}$ ” el valor del error mínimo.  $n\sigma$  representa un índice que resulta de dividir la diferencia entre el máximo y mínimo error ( ) con dos veces la desviación estándar, se deduce de la “Regla Empírica” (Bernstein & Bernstein, 1999) que los datos de la muestra tienen el comportamiento de una curva de distribución normal ya que el total de datos se encuentran dentro de  $\pm 3\sigma$ . Estos mismos criterios se aplicarán de aquí en adelante para el análisis de la desviación estándar y los errores máximos y mínimos.



*Figura 51.* Error Promedio por Ángulo de Incidencia. Elaboración propia.



*Figura 52.* Error Promedio de las Medidas Obtenidas del Sistema por Ángulo de Incidencia. Elaboración propia.

En cuanto al segundo factor a evaluar, la incidencia del tamaño del tablero de ajedrez o tamaño de cuadrícula del patrón de calibración en el error total de las mediciones, se observa que no existe una tendencia visible en los resultados que indique que el mayor o menor tamaño de estos patrones usados tiene mejor resultado. Se puede apreciar en la tabla 10 que, por ejemplo,

que tanto los patrones de 1 mm y 5 mm presentan un error total de 10% pero con un grado de dispersión muy diferente (0.186 y 0.256) respectivamente, la figura 53 nos muestra la gráfica de los errores promedios por patrón y la figura 54 nos muestra también la desviación estándar de los errores promedios mostrados en la figura 53, se puede apreciar que no hay un valor que indique que este factor mejore o sea peor para los resultados de medición del sistema.

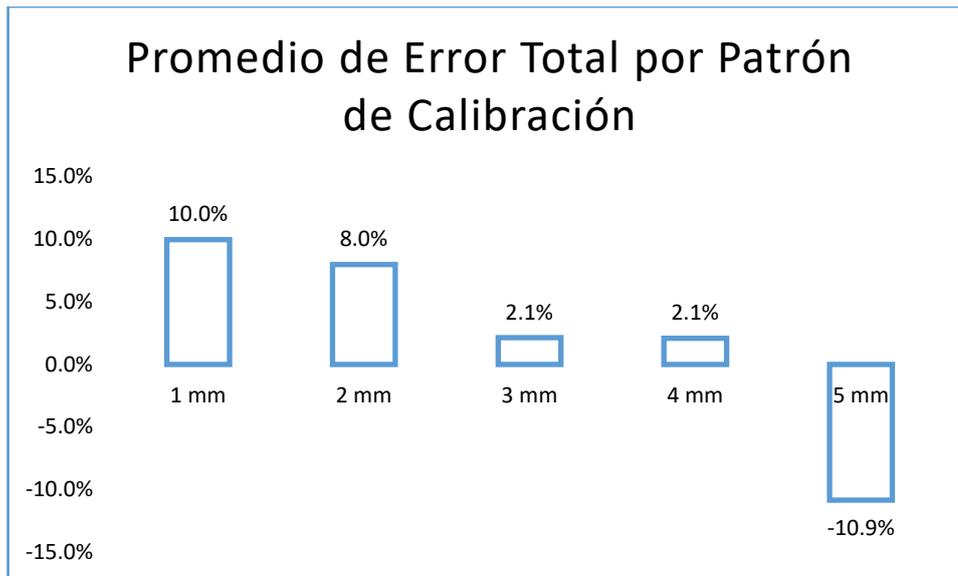
Por otro lado, se podría decir que el haber empleado un plotter comercial para obtener las cuadrículas pequeñas del orden de los milímetros podría influir en los errores más altos con los patrones de menor dimensión, ya que era notorio que mientras más pequeño el patrón (1 mm), menos uniformes eran las líneas de cada cuadrícula de los patrones.

*Tabla 10*

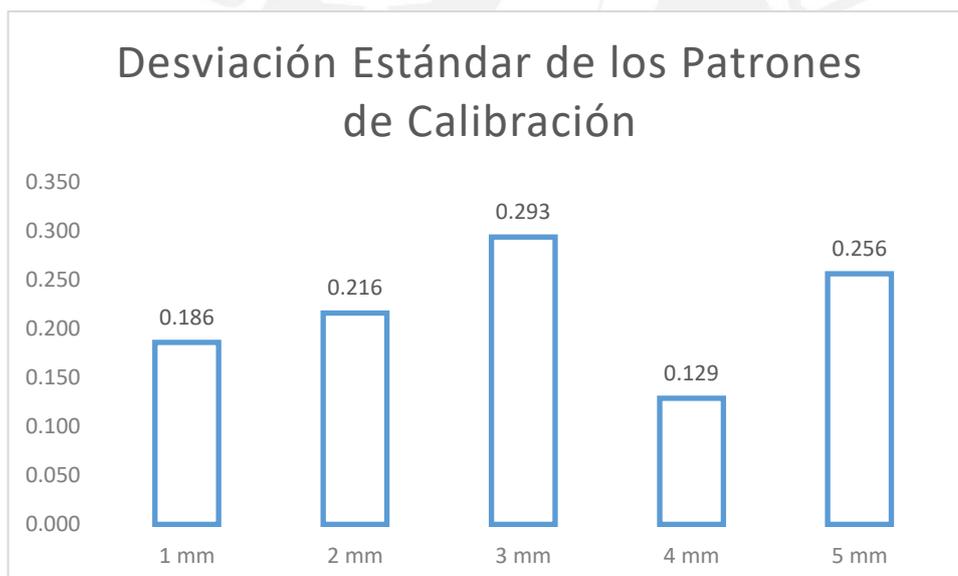
Error Promedio Total por Patrón de Calibración

<b>Patrón de Calibración</b>	$\bar{e}$ (%)	$\sigma$	$e_{\max}$	$e_{\min}$	$n\sigma$
1 mm	10.0%	0.186	0.10	-0.24	0.914
2 mm	8.0%	0.216	0.08	-0.65	1.692
3 mm	2.1%	0.293	0.02	-0.99	1.723
4 mm	2.1%	0.129	0.02	-0.31	1.284
5 mm	-10.9%	0.256	-0.11	-0.97	1.684

Nota. Elaboración propia.



*Figura 53.* Error Promedio Total en las Medidas Obtenidas por cada Patrón de calibración Empleado Diversos Patrones de Calibración. Elaboración propia.



*Figura 54.* Desviación Estándar de los Errores Promedios Totales para cada Cuadrícula o Patrón de calibración empleado. Elaboración propia.

Finalmente, como último factor de discusión, analizaremos una variable de ingreso al sistema que sería en este caso el tamaño real de las fallas simuladas. Como se mencionó en la sección 4.4, las fallas simuladas se trazaron manualmente por lo que un error de tipo humano puede causar la variación de sus medidas por exceso o defecto con respecto del valor teórico u

objetivo que se quiere medir. La tabla 11 muestra el resultado de promediar todos los valores obtenidos al variar los ángulos de incidencia y los patrones de calibración.

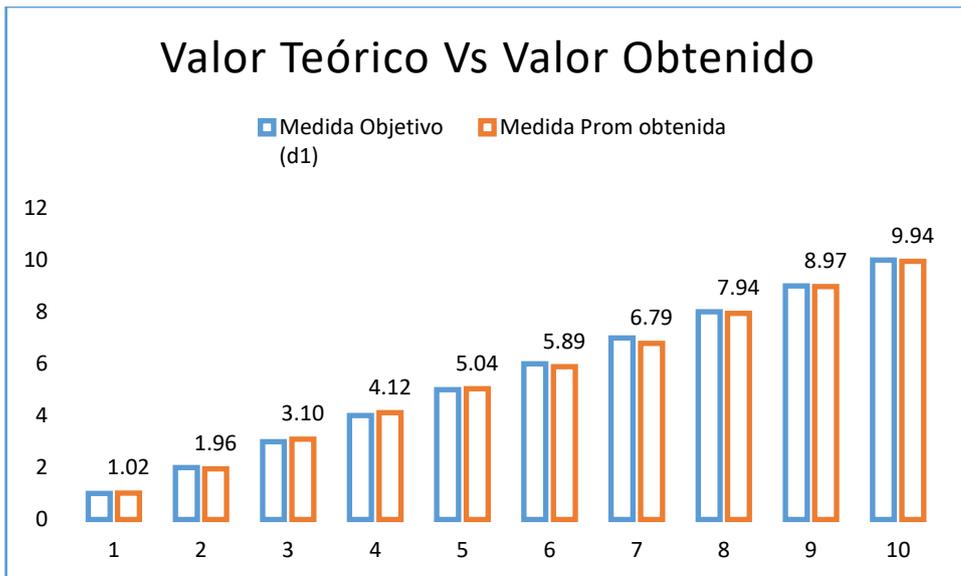
*Tabla 11*

Valores Promedios Totales respecto al Valor Teórico de la Falla

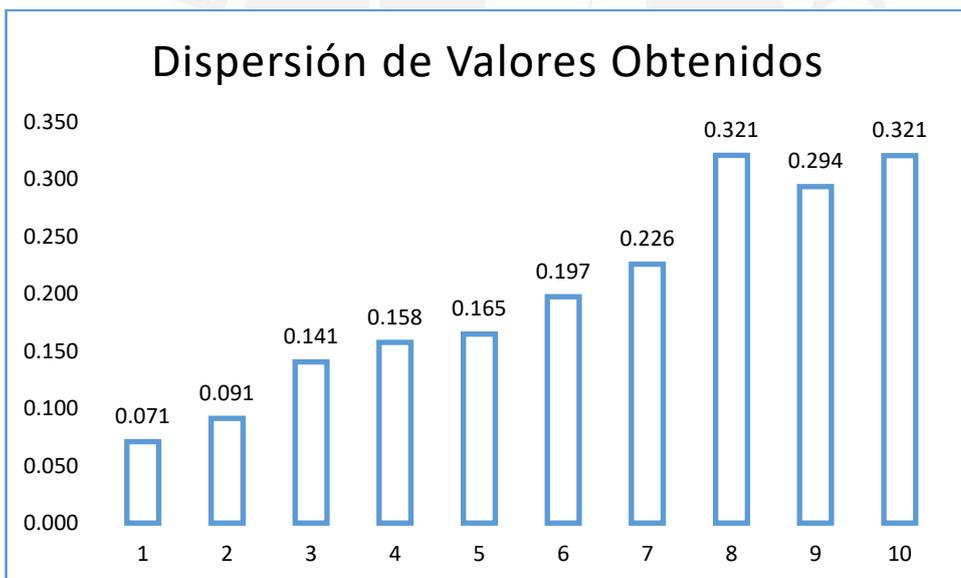
<b>Teórico</b>	<b>Promedio</b>	<b><math>\sigma</math></b>	<b><math>\epsilon_{\max}</math></b>	<b><math>\epsilon_{\min}</math></b>	<b><math>n\sigma</math></b>
1	1.02	0.071	0.100	-0.230	0.012
2	1.96	0.091	0.270	-0.180	0.021
3	3.10	0.141	0.390	-0.550	0.066
4	4.12	0.158	0.490	-0.520	0.080
5	5.04	0.165	0.440	-0.590	0.085
6	5.89	0.197	0.530	-0.490	0.101
7	6.79	0.226	0.710	-0.570	0.145
8	7.94	0.321	1.150	-0.850	0.321
9	8.97	0.294	0.590	-0.990	0.232
10	9.94	0.321	0.750	-0.970	0.276

Nota. Elaboración propia.

Estos resultados muestran que se tiene uniformidad en las mediciones hechas por el sistema propuesto y que mientras menor sea el tamaño del objetivo a medir (en mm), mejor precisión se tendrá disminuyendo así los errores promedios (en mm). Esto demuestra también que la cámara empleada es adecuada para magnitudes de este orden, lo mencionado en este párrafo se puede apreciar en las figuras 55 y 56.



*Figura 55.* Valores Promedios Obtenidos en Todas las Mediciones Hechas con el Sistema comparados con los Valores Inducidos de la Medida de las Fallas. Elaboración propia.



*Figura 56.* Desviación Estándar de las Medidas Obtenidas con el Sistema por Valor Objetivo de la Falla Simulada. Elaboración propia.

#### 4.5.1. Comparación con Otros Métodos

La figura 57 muestra el grado de precisión en la medición de rajaduras del equipo Mentor Visual IQ de General Electric. La figura muestra la tendencia al error con dos técnicas que tienen estos equipos (3DPM y 3DST) en cuanto a la medición de la longitud de una rajadura (medición punto a punto como la que se realizó en el presente trabajo) con una longitud de 5.33 mm y una cámara de 6.1 mm de diámetro. En el orden de las abscisas se ubica la máxima distancia hacia el objetivo (MDT) y en el orden de las ordenadas el error promedio total obtenido variando  $50^\circ$  el ángulo de incidencia.

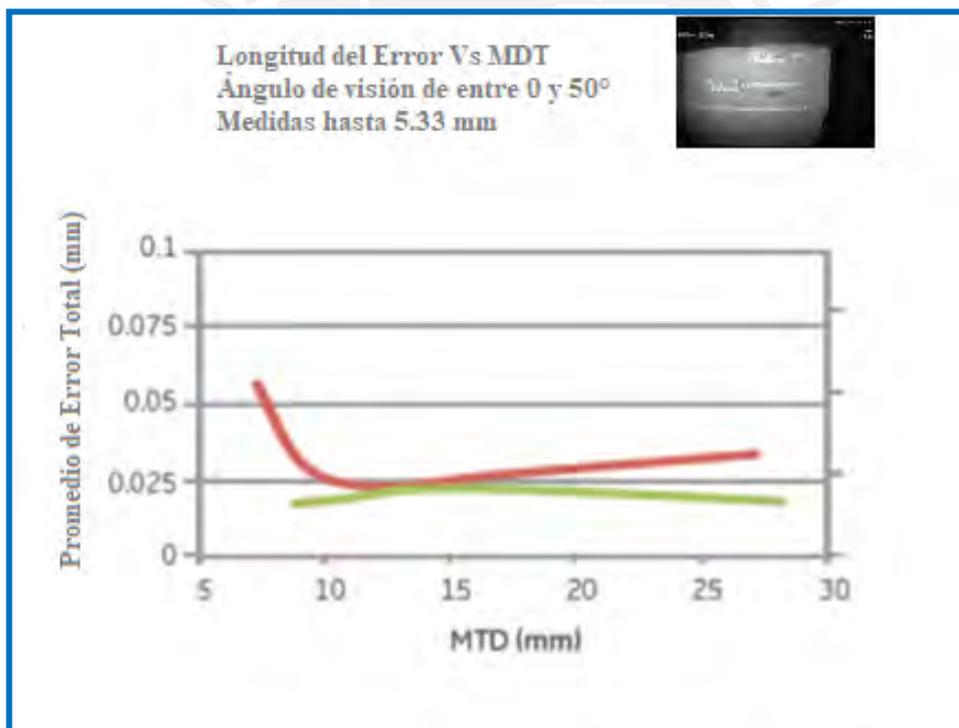


Figura 57. Error Promedio de una Medición de 5.33 mm con diferentes ángulos de incidencia y nivel de profundidad entre la cámara y el objeto a medir. Adaptado de Videoprobe 3D Measurement Handbook de General Electric, GEA31907B. Mayo de 2017.

Se puede apreciar que en promedio el error obtenido está entre 0.025 y 0.03 mm. Para poder compararlo con el sistema propuesto vemos el error promedio total de las mediciones hechas con diversos ángulos y patrones de calibración con la medida de la falla de 5 mm, estos resultados se muestran en la tabla 12.

*Tabla 12*

Valores Promedios Totales respecto al Valor de la Falla de 5mm

<b>Patrón de Calibración</b>	<b>Medida de la falla</b>	$\bar{e}$	$\sigma$
1	5	0.028	0.075
2	5	-0.077	0.126
3	5	-0.002	0.209
4	5	0.003	0.056
5	5	-0.16	0.231

Nota. Elaboración propia.

Se puede apreciar que, con los patrones de calibración mayores a 1 mm se obtienen resultados aceptables comparados a los que brindan estos equipos comerciales. Esto se deduce ya que los valores de los errores promedio son incluso menores. Un punto en particular a notar es que para el patrón de 4 mm tanto el error promedio como la dispersión de los datos es mínima, por lo que se recomendaría esta configuración para este tamaño de medida.

#### **4.5.2. Comparación con la Realidad de Otros Equipos Comerciales**

Como se pudo apreciar en la sección 4.5.1, este método nos brinda resultados satisfactorios con respecto a los métodos de medición con los que se comparó el diseño propuesto. La principal

ventaja de este método es que propone una solución muy económica con respecto a los equipos mostrados que cuentan con un mayor costo de adquisición y mantenimiento. Las cámaras y sondas pueden ser proveídas de fabricantes como MISUMI (<http://www.misumi.com.tw/>), Schoelly (<https://www.schoelly.de/en/>) o CCOM (<http://www.ccom-tech.com/>).

#### **4.5.3. Propuestas Futuras**

El diseño de este sistema de inspecciones boroscópicas estuvo orientado para turbinas que podríamos denominar pequeñas por su tamaño físico. En el caso de querer aplicarlo a turbinas más grandes en propuestas futuras, se deberá estudiar los parámetros y características de dichas turbinas pudiendo emplear la misma metodología de calibración y medición de acuerdo a los nuevos parámetros propuestos. EL modelo presentado también puede ampliar su gama de aplicaciones para medir otros lugares inaccesibles como por ejemplo en cajas de transmisión y reductoras de motores o también de sistemas impulsores de rotores de helicópteros.

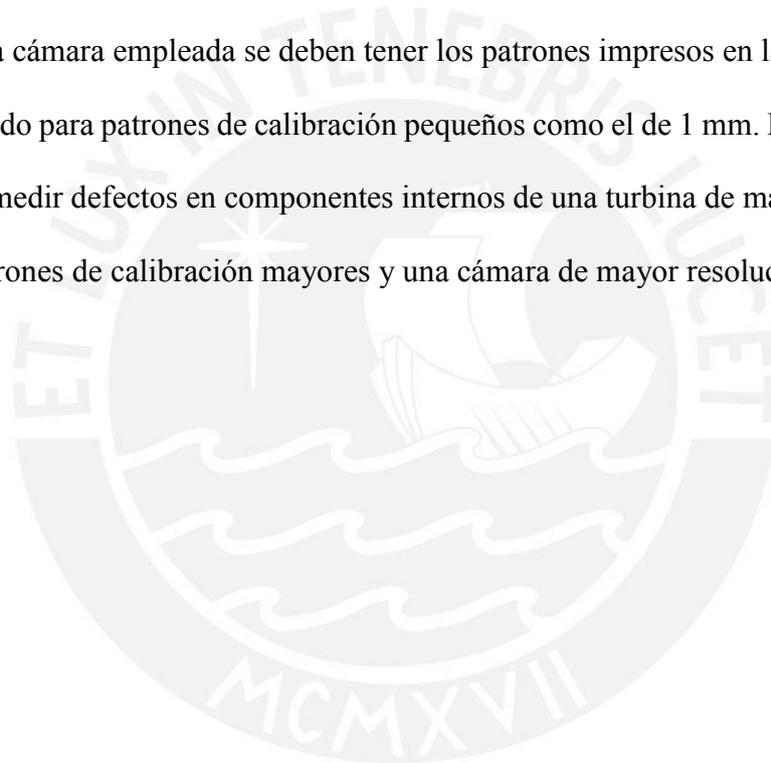
Otra aplicación del modelo propuesto puede complementarse para determinar áreas de superficies y longitudes multisegmento. Las aplicaciones del modelo propuesto también podrían expandirse al campo médico para poder hacer la medición de cánceres o tumores malignos y otro tipo de males como úlceras. En este caso se deberá cumplir los estándares de construcción medico ya que el modelo propuesto está diseñado para trabajar con sistemas mecánicos y no orgánicos.

## CONCLUSIONES

- El equipo de bosrografía propuesto demuestra tener un buen nivel de medición que en algunos casos supera a los comerciales y se puede emplear para diferentes modelos de turbinas de aviones y helicópteros que tienen los mismos requerimientos de uso (turbinas pequeñas por lo general).
- El equipo propuesto muestra muchas ventajas en cuanto al costo de inversión ya que el prototipo al emplear una sonda cuyo costo es aproximadamente \$2,000.00 y al hacerlo trabajar con los algoritmos desarrollados, el costo sería menor a los \$50,000.00 que costaría adquirir un equipo comercial de alta gama que se encuentra en el mercado.
- Se concluye también que lo desarrollado en el presente trabajo es un prototipo efectivo al cual se le podrían incluir algoritmos adiciones para potenciar la visión por computadora y este sirva de base para un futuro diseño con características más eficientes y automatizadas.
- Adicionalmente, también se puede concluir, como parte de la investigación, que para el sistema de medición boroscópica diseñado el ángulo de incidencia entre la cámara y el plano del objeto de medición tiene un efecto directo en la eficiencia del sistema y mientras más cercano se encuentre el valor de este ángulo al ángulo recto, mejor serán los resultados. Por los resultados mostrados en la figura 51 y 52, se recomienda usarlo con un ángulo de incidencia mayor a los  $75^\circ$  para obtener mejores resultados de medición.
- También como parte de la investigación, se puede concluir en general, que no existe evidencia de que el tamaño del patrón de calibración en las medidas usadas de 1mm a 5 mm,

tengan incidencia directa en los resultados, ya que por ejemplo un patrón pequeño puede tener un alto grado de error como un patrón como se aprecia en la tabla 10 con los errores de los patrones de 1 y 5 mm grande y se ve que la desviación estándar tampoco presenta una tendencia definida. Asimismo, se puede decir que el sistema es aceptable para mediciones entre 1 a 6 mm, que son los valores en los que las desviaciones estándar muestran valores menores a 0.2 mm en base a los resultados obtenidos en la tabla 10.

- Como conclusión final, para poder realizar el cálculo de los parámetros intrínsecos y extrínsecos de la cámara empleada se deben tener los patrones impresos en la mayor precisión posible, sobre todo para patrones de calibración pequeños como el de 1 mm. En caso se emplee el sistema para medir defectos en componentes internos de una turbina de mayor envergadura, se debe usar patrones de calibración mayores y una cámara de mayor resolución.



## BIBLIOGRAFÍA

- Almasi, A. (2016). Latest Lessons Learned, Modern Condition Monitoring and Advanced Predictive Maintenance for Gas Turbines. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 14(3), 199-211, doi: 10.1080/14484846.2015.1093252.
- Bernstein, S., & Bernstein, R. (1999). *Schaum's Outline of Theory and Problems of Elements of Statistics*. New York: McGraw-Hill.
- Erhard, A. (2013). Non-destructive Evaluation. En H. Czichos (Ed.), *Handbook of Technical Diagnostics* (pág. 161). Berlin: Springer. doi:10.1007/978-3-642-25850-3\_9
- Faugeras, O. (1993). *Three-Dimensional Computer Vision: A Geometric Viewpoint*. Londres: MIT Press.
- Faugeras, O. D., & Luong, Q.-T. (1997). Self-Calibration of a Moving Camera from Point Correspondences and Fundamental Matrices. *International Journal of Computer Vision*, 22, 261–289, doi: 10.1023/A:1007982716991.
- Golub, G. H., & Van Loan, C. F. (2013). *Matrix Computations*. Maryland: The Johns Hopkins University Press.
- Hanachi, H., Mechefske, C., Liu, J., Banerjee, A., & Chen, Y. (2018). Performance-Based Gas Turbine Health Monitoring. *IEEE Transactions on Reliability*, 67(3), 1340-1363.
- Hartley, R. I. (1994). An Algorithm for Self Calibration from Several Views. *1994 Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 908-912, doi: 10.1109/CVPR.1994.323923.
- Inanc, F. (2005). A Borescope Based Optical Surface Characterization Approach. *AIP Conference Proceedings*, 1622 - 1629.
- Klette, R. (2014). *Concise Computer Vision*. Londres: Springer.
- Kulikov, G. G., & Thompson, H. A. (2004). *Dynamic Modelling of Gas Turbines*. London: Springer.

Kurz, R., Brun, K., & Wollie, M. (2009). Degradation Effects on Industrial Gas Turbines.

*Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 13(6), 1-7, doi:

10.1115/1.3097135.

Maybank, S., & Faugeras, O. (1992). A theory of self-calibration of a moving camera.

*International Journal of Computer Vision*, 8, 123-151, doi: 10.1007/BF00127171.

Meher-Homji, C., Chaker, M., & Hatim, M. (2001). Gas Turbine Performance Deterioration.

*Proceedings of the 30th Turbomachinery Symposium*, , 139-175.

More, J. J. (1977). The Levenberg-Marquardt Algorithm, Implementation, and Theory. En G.

Watson, *Numerical Analysis* (págs. 105-116). New York: Springer-Verlag.

Mustafah, Y., Noor, R., Hasbi, H., & Wong Azma, A. (2012). Stereo Vision Images

Processing for Real-time. *International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE 2012)*, 659-663.

Ng, A. (2014). Advances in 3D Video Borescope Measurement Technologies for Defect

Characterization. *GE Measurement & Control, Inspection Technologies*, 1-8.

Petek, J., & Hamilton, P. (2005). Performance Monitoring For Gas Turbines. *Orbit*, 25(1),

65-74.

Pratt & Whitney. (22 de Febrero de 2019). Maintenance Manual, Manual Part No.3021242.

*Engine Inspection*.

Rahman, K. A., Hossain, S., Bhuiyan, A.-A., Zhang, T., Hasanuzzaman, M., & Ueno, H.

(2009). Person to Camera Distance Measurement Based on Eye-Distance. *2009 Third International Conference on Multimedia and Ubiquitous Engineering*, 137-141, doi:

10.1109/MUE.2009.34.

Riffo, V., & Mery, D. (2011). Active X-ray Testing of Complex Objects. *Insight: Non-*

*Destructive Testing and Condition Monitoring*, 54(1), 28-35, doi:

10.1784/insi.2012.54.1.28.

- Semple, J. G., & Kneebone, G. T. (1958). *Algebraic Projective Geometry*. Londres: Oxford: Clarendon Press.
- Shimizu, I., Zhang, Z., Akamatsu, S., & Deguchi, K. (1998). Head Pose Determination from One Image Using a Generic Model. *Proceedings Third IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition*, 100-105, doi: 10.1109/AFGR.1998.670932.
- Szeliski, R. (2011). *Computer Vision: Algorithms and Applications*. London: Springer-Verlag.
- Tsai, R. Y. (1987). A Versatile Camera Calibration Techniaue for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-shelf TV Cameras and Lenses. *IEEE Journal on Robotics and Automation*, 3(4), 323-344, doi: 10.1109/JRA.1987.1087109.
- Turbomeca Training. (February de 2014). Arriel 2E - 1st Line Maintenance Course. *Training Notes Arriel 2E LI*.
- Valdivia Arias, C. J. (2016). *Diseño de un Sistema de Visión Artificial para la Clasificación de Chirimoyas basado en medidas*. Lima - Perú. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.12404/7849>
- Wahab, M., Sivadev, N., & Sundaraj, K. (2011). Target Distance Estimation Using Monocular Vision. *2011 IEEE Conference on Open Systems*, 11-15, doi: 10.1109/ICOS.2011.6079296.
- Wang, Y., Li, B., Chen, L., & Jiang, Z. (2015). Region Segmentation Based Radiographic Detection of Defects for Gas Turbine Blades. *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, 1681-1685.
- Yan-ying, G., Zhi-gang, L., & Qing-ji , G. (2019). Based on Weighted Morphology Aero-engine Bore Scope Cracks Image Segmentation. *ICMLC '19: Proceedings of the 2019*

*11th International Conference on Machine Learning and Computing*, 451-455.

doi:10.1145/3318299.3318371

Yildirim, M. T., & Kurt, B. (2018). Aircraft Gas Turbine Engine Health Monitoring System by Real Flight Data. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2018(9570873), 1-12, doi: 10.1155/2018/9570873.

Zhang, Z. (2000). A Flexible New Technique for Camera Calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22(11), 1330-1334, doi: 10.1109/34.888718.



**ANEXOS**



**ANEXO 01**

Pixelamiento de la imagen: En este procedimiento se reduce la imagen a un mínimo número de pixeles para luego poder identificar el tipo de falla:

```
clear all;

close all;

clc;

I1 = imread('Astilla.jpg','jpg');

figure(1);

imshow(uint8(I1));

I2 = I1;

Iz = I1(:, :, 2);

[nf nc] = size(Iz);

figure(2);

imshow(uint8(Iz));

for f = 1:nf

    Ifila = Iz(f,:);

    if(any(Ifila < 255))

        break;

    end

end

%nfc = 1800;

nfc = 180; %1750;

Iz1 = Iz(f:nfc,:);

figure(3);
```

```
imshow(uint8(Iz1));  
for c1 = 1:nc  
    Icol = Iz1(:,c1);  
    if(any(Icol < 255))  
        break;  
    end  
end  
  
Iz2 = Iz1(:,c1:nc);  
figure(4);  
imshow(uint8(Iz2));  
[nc2 nf2] = size(Iz2);  
for c2 = nc2:-1:1  
    Icol = Iz2(:,c2);  
    if(any(Icol < 240))  
        break;  
    end  
end  
  
Iz3 = Iz2(:,1:c2);  
figure(5);  
imshow(uint8(Iz3));  
[ff cc] = size(Iz3);  
ff1 = 10*floor(ff/10);  
cc1 = 10*floor(cc/10);  
  
% Pixelamiento en cuadrados de 10x10  
% Izz = Iz3(1:720,1:530);
```

```

ii = 1;
for i = 1:10:ff1
    jj = 1;
    for j = 1:10:cc1
        im = Iz3(i:i+9,j:j+9);
        im = sum(sum(im))/100;
        Inueva10(ii,jj) = round(im);
        jj = jj + 1;
    end
    ii = ii + 1;
end
figure(8);
imshow(uint8(Inueva10));
% Pixelamiento en cuadrados de 20x20
% Izz = Iz3(1:1640,1:1380);
% Izz = Iz3(1:720,1:520)
ff2 = 20*floor(ff/20);
cc2 = 20*floor(cc/20);
ii = 1;
for i = 1:20:ff2
    jj = 1;
    for j = 1:20:cc2
        im = Iz3(i:i+19,j:j+19);
        im = sum(sum(im))/400;
        Inueva20(ii,jj) = round(im);
    end
end

```

```
    jj = jj + 1;
end
ii = ii + 1;
end
figure(9);
imshow(uint8(Inueva20));
I40 = Inueva20;
I40bn = 255*round(I40/255*0.85);
figure(13);
imshow(uint8(I40bn));
I41bn = 255*round(I40/255*0.90);
figure(14);
imshow(uint8(I41bn));
I42bn = 255*round(I40/255*0.95);
figure(15);
imshow(uint8(I42bn));
```

## ANEXO 02

Para el reconocimiento del tipo de fallas se tiene el siguiente tipo de entrenamiento:

```
% Entrenamiento patron
```

```
clear;
```

```
clc;
```

```
close all;
```

```
% Pixel blanco = 0
```

```
% Pixel negro = 1
```

```
Falla1 = [0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0
```

```
0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0
```

```
0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 0 0 0 0 1 1 1 0 0 0
```

```
0 0 0 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 0
```

```
0 0 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 0
```

```
0 0 1 1 1 1 1 1 0 0 1 0 0 0 0 1 0 0 1 0
```

```
0 1 1 1 0 0 1 0 0 1 1 1 0 0 1 1 1 0 0 1
```

```
0 1 1 0 0 1 1 0 0 0 1 0 0 0 0 1 0 0 0 1
```

```
0 1 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1
```

```
1 1 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 1
```

```
1 1 1 0 0 1 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 1
```

```
0 1 0 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 0 0 0 0 0 1
```

```
0 0 0 0 0 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0
```

```
0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 1 0 0 0 1 0 0 1 1 0
```

```
0 0 0 0 0 0 1 1 0 0 0 1 1 1 0 0 1 1 0 0
```

```
0 0 0 0 0 0 0 1 1 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0
```

```

00000011110000011000
0000111111111110000
0011111111111111100
111111111111111110];

```

```
Falla2 = [0000111111111000000
```

```

0000111111111000000
1111111111111111111
1111111111111111111
1111111111111111111
0000111111111000000
00011100000011100000
00011000000001100000
00110000000000110000
00100111001110010000
00100000010000010000
00100000010000010000
00100000010000010000
001000000000000110000
00110001111001100000
00010010000101000000
00001000000001000000
00001111111110000000
11111111111111000000
1111111111111111111];

```

```
Falla3 = [0000111111111111000
```

```

0001111111111111111100
0011111111111111111110
0011111111000011111111
0111111000000011111111
0111110000000001111111
0111100000000000111111
00111001100011000100
00011001100011000110
00010000001000000110
00010000001000000010
00010000001000000010
00010000011100000010
00010000000000000100
00011000111110000100
00001001000001001100
00000100000000011000
00000111000001110000
00000001111111000000
00111111111111111111];

```

```
Falla4 = [00000011111111000000
```

```

00001111111111110000
00011111111111110000
00111111111111111110
01111100000111111111
00001000000001111000

```

```

00001000000000111000
00010011100111001100
00010000001000000100
00010000001000000100
00010000001000000100
00010000001000000100
00010000001000000100
00010000000000000100
00011000111110001000
0000010000000010000
00000011000001100000
00000000111110000000
00000000111110000000
00000011111111100000
000011111111111111];
[nf nc] = size(Falla1);
x(1,:) = Falla1(1,:);
x(2,:) = Falla2(1,:);
x(3,:) = Falla3(1,:);
x(4,:) = Falla4(1,:);
for k = 2:nf
    fallas = [ Falla1(k,:)
              Falla2(k,:)
              Falla3(k,:)
              Falla4(k,:) ];
    x = [ x caras ];

```

```

end

[ nxf nxc ] = size(x);

nx = nxf;

yb(1,:) = [ 1 0 0 0 ];
yb(2,:) = [ 0 1 0 0 ];
yb(3,:) = [ 0 0 1 0 ];
yb(4,:) = [ 0 0 0 1 ];

[ nyf nyc ] = size(yb);

ny = nyf;

ne = nxc;

nm = 20;

ns = nyc;

bias = input('Bias: SI = 1 : ');

if(bias == 1)
    ne = ne +1;
    x = [ x ones(nx,1) ];
end

v = 0.2*(rand(ne,nm) - 0.5);

w = 0.2*(rand(nm,ns) - 0.5);

% load pesosfallas;

eta = input('eta pesos : ');

for iter = 1:3000

count(iter,1) = iter;

dJdw = 0;

dJdv = 0;

```

```

for k = 1:nx
in = (x(k,:))';
m = v'*in;
n = 1.0./(1+exp(-m)); % Sigmoidea 1
%n = 2.0./(1+exp(-m)) - 1; % sigmoidea 2
%n = exp(-m.^2); % Gaussiana
out = w'*n;
y(k,:) = out';
er = out - (yb(k,:))';
error(k,:) = er';
dndm = n.*(1 - n); % Sigmoidea 1
%dndm = (1 - n.*n)/2; % Sigmoidea 2
%dndm = -2.0*(n.*m); % Gaussiana
dydw = n;
dJdw = 1*dJdw + dydw*er';
dJdv = 1*dJdv + in*((w*er).*dndm)';
%w = w - eta*dJdw/nx;
%v = v - eta*dJdv/nx;
end
w = w - eta*dJdw/nx;
v = v - eta*dJdv/nx;
JJ = 0.5*sum(sum(error.*error))
J(iter,1) = JJ;
end
save pesosfallas ne ns nm v w bias;

```

```
figure(1);  
plot(y(1,:), 'or'); % Se grafica sin redondeo  
hold on;  
plot(yb(1,:), '*b');  
figure(2);  
plot(count, J);
```



**ANEXO 03**

Para la validación de la falla se tiene:

```
clear;
```

```
clc;
```

```
close all;
```

```
falla = [ 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0
```

```
0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0
```

```
0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0
```

```
0 0 0 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 0
```

```
0 0 0 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 0
```

```
0 0 0 1 1 1 1 1 0 0 1 0 0 0 0 1 0 0 1 0
```

```
0 0 0 1 0 0 1 0 0 1 1 1 0 0 1 1 1 0 0 1
```

```
0 0 0 0 0 1 1 0 0 0 1 0 0 0 0 1 0 0 0 1
```

```
0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1
```

```
0 0 0 0 0 1 0 0 0 1 0 0 1 0 0 0 0 0 0 1
```

```
0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 0 0 1 0 0 0 0 0 0 1
```

```
0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 0 0 0 0 0 1
```

```
0 0 0 0 0 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0
```

```
0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 1 0 0 0 1 0 0 1 1 0
```

```
0 0 0 0 0 0 1 1 0 0 0 1 1 1 0 0 1 1 0 0
```

```
0 0 0 0 0 0 0 1 1 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0
```

```
0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 1 0 0 0
```

```
0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0
```

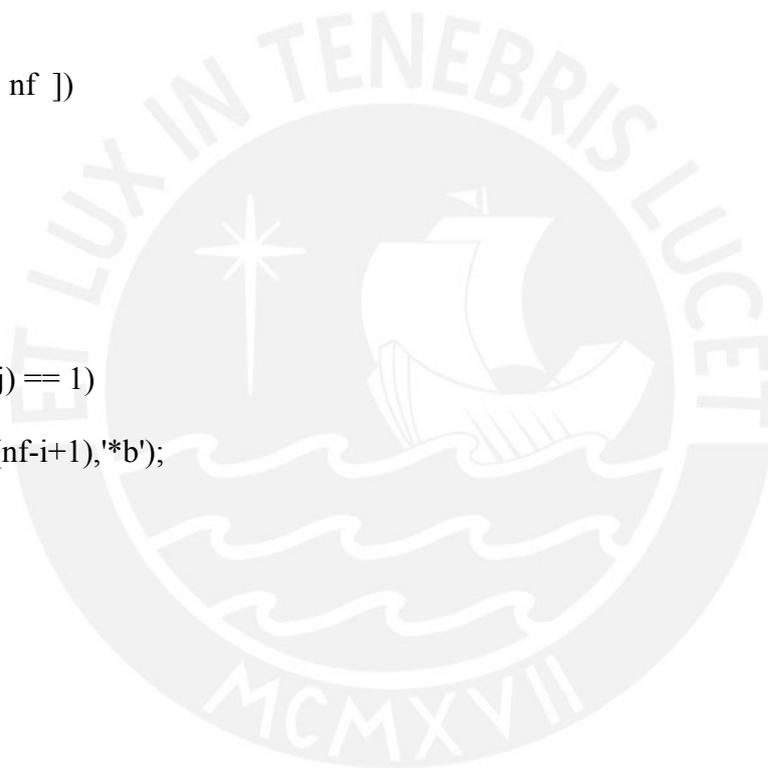
```
0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0
```

```

1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 ];
[nf nc] = size(falla);
x(1,:) = falla(1,:);
for k = 2:nf
    x = [ x falla(k,:) ];
end
[ nxf nxc ] = size(x);
nx = nxf;
% ne = nxc;
% ns = 4;
load pesosfallas; % Carga nm v w bias
if(bias == 1)
    ne = ne +1;
    x = [ x ones(nx,1) ];
end
in = x';
m = v'*in;
n = 1.0./(1+exp(-m)); % Sigmoidea 1
%n = 2.0./(1+exp(-m)) - 1; % sigmoidea 2
%n = exp(-m.^2); % Gaussiana
out = w'*n;
y = out;
[maxy k] = max(y);
if(k == 1)
    disp('La Falla es 1');

```

```
elseif(k == 2)
    disp('La Falla es 2');
elseif(k == 3)
    disp('La Falla es 3');
elseif(k == 4)
    disp('La Falla es 4')
end
figure(1);
axis([ 0 nc 0 nf ])
hold on;
for i = 1:nc
    for j = 1:nf
        if(falla(i,j) == 1)
            plot(j,(nf-i+1),'*b');
        end
    end
end
end
```



## ANEXO 04

```

clear;

clc;

close all;

% Crear un vector para almacenar la direccion de la base de datos(fotos).

numImages = 13;

files = cell(1, numImages);

for i = 1:numImages

    files{i} = fullfile('D:\','PUCP',...

        '4to ciclo','Tesis 2','Calibracion','Final','1mm45d', sprintf('Foto%d.jpg', i));

end

%Magnificación de una imagen:

magnification = 75;

I = imread(files{1});

figure; imshow(I, 'InitialMagnification', magnification);

title('Una de las imágenes para la Calibration');

%Estimacion de los parametros de la cámara:

[imagePoints, boardSize] = detectCheckerboardPoints(files);

Tamcuadrado = input('Ingrese el valor de medida del cuadrado en mm:');

worldPoints = generateCheckerboardPoints(boardSize, Tamcuadrado);

imageSize = [size(I, 1), size(I, 2)];

cameraParams = estimateCameraParameters(imagePoints, worldPoints, ...

    'ImageSize', imageSize);

figure; showReprojectionErrors(cameraParams);

title('Reprojection Errors');

```

```

imOrig = imread(fullfile('D:\','PUCP',...
    '4to ciclo','Tesis 2','Calibracion','Final','1mm45d','5mm22.jpg'));
figure; imshow(imOrig, 'InitialMagnification', magnification);
title('Imagen de Objeto a Medir');
[im, newOrigin] = undistortImage(imOrig, cameraParams, 'OutputView', 'full');
figure; imshow(im, 'InitialMagnification', magnification);
title('Imagen desdistorcionada');

%Convertimos la imagen al espacio de color HSV.
imHSV = rgb2hsv(im);
% Obtenemos la saturación del canal.
saturation = imHSV(:, :, 2);
% Calculo del umbral de la imagen
t = graythresh(saturation);

%Detección de las caudrículas:
[imagePoints, boardSize] = detectCheckerboardPoints(im);

%Determina la rotación y la traslación de la cámara:
[R, t] = extrinsics(imagePoints, worldPoints, cameraParams);

% Capturamos los puntos entre los cuales se debe hacer la medición de distancia.

% Estableciendo la región de interés
imGray = rgb2gray(imOrig);
imshow (imGray); title('Original en escala de grises');
%[r c]= ginput(4);
BW = roipoly; %(imOrig,r,c);
figure

```

```

imshow(BW);title('Polígono de la roi');

[raw C]=size(BW);

for i=1:raw
    for j=1:C
        if BW(i,j)==1
            Out(i,j)=imGray(i,j);
        else
            Out(i,j)=1;
        end
    end
end

figure;
imshow(Out,[]); title('Region de interés');

% Se aplica el filtro Canny
imBorde = edge(Out,'Canny');

figure

imshow(imBorde);

title('Selección de Puntos');

[x,y] = getpts

imagePoints = [x,y];

% Obtenemos las coordenadas

worldPoints1 = pointsToWorld(cameraParams, R, t, imagePoints);

% Calculo de la distancia en milímetros.

```

```
d = worldPoints1(2, :) - worldPoints1(1, :);  
distanceInMillimeters = hypot(d(1), d(2));  
fprintf('Distancia = %0.2f mm\n', distanceInMillimeters);
```



## ANEXO 05

Base de datos de resultados experimentales:

Nº	Patrón	Ángulo	Medida Real (d1)	Medida Obtenida (d2)	Error (d1-d2)
1	1 mm	90°	1	1.01	-0.01
2	1 mm	90°	2	2.03	-0.03
3	1 mm	90°	3	3.2	-0.2
4	1 mm	90°	4	4.14	-0.14
5	1 mm	90°	5	4.99	0.01
6	1 mm	90°	6	5.9	0.1
7	1 mm	90°	7	6.81	0.19
8	1 mm	90°	8	8.08	-0.08
9	1 mm	90°	9	9	0
10	1 mm	90°	10	10.02	-0.02
11	1 mm	85°	1	0.95	0.05
12	1 mm	85°	2	1.92	0.08
13	1 mm	85°	3	3.15	-0.15
14	1 mm	85°	4	4.1	-0.1
15	1 mm	85°	5	4.96	0.04
16	1 mm	85°	6	5.93	0.07
17	1 mm	85°	7	6.78	0.22
18	1 mm	85°	8	8.01	-0.01
19	1 mm	85°	9	8.99	0.01
20	1 mm	85°	10	9.91	0.09
21	1 mm	80°	1	0.94	0.06
22	1 mm	80°	2	1.95	0.05
23	1 mm	80°	3	3.02	-0.02
24	1 mm	80°	4	4.02	-0.02
25	1 mm	80°	5	5.01	-0.01
26	1 mm	80°	6	5.87	0.13
27	1 mm	80°	7	6.83	0.17
28	1 mm	80°	8	7.93	0.07
29	1 mm	80°	9	8.96	0.04
30	1 mm	80°	10	9.9	0.1
31	1 mm	75°	1	1.02	-0.02
32	1 mm	75°	2	1.98	0.02
33	1 mm	75°	3	3.11	-0.11
34	1 mm	75°	4	4.18	-0.18
35	1 mm	75°	5	5.14	-0.14
36	1 mm	75°	6	5.88	0.12
37	1 mm	75°	7	6.72	0.28
38	1 mm	75°	8	7.9	0.1
39	1 mm	75°	9	8.99	0.01
40	1 mm	75°	10	9.94	0.06

Nº	Patrón	Ángulo	Medida Real (d1)	Medida Obtenida (d2)	Error (d1-d2)
41	1 mm	70°	1	0.96	0.04
42	1 mm	70°	2	1.92	0.08
43	1 mm	70°	3	3.05	-0.05
44	1 mm	70°	4	4.16	-0.16
45	1 mm	70°	5	4.99	0.01
46	1 mm	70°	6	5.9	0.1
47	1 mm	70°	7	6.68	0.32
48	1 mm	70°	8	7.92	0.08
49	1 mm	70°	9	8.87	0.13
50	1 mm	70°	10	9.84	0.16
51	1 mm	65°	1	0.94	0.06
52	1 mm	65°	2	1.96	0.04
53	1 mm	65°	3	3.08	-0.08
54	1 mm	65°	4	4.23	-0.23
55	1 mm	65°	5	4.98	0.02
56	1 mm	65°	6	5.83	0.17
57	1 mm	65°	7	6.77	0.23
58	1 mm	65°	8	7.86	0.14
59	1 mm	65°	9	8.93	0.07
60	1 mm	65°	10	9.81	0.19
61	1 mm	60°	1	0.95	0.05
62	1 mm	60°	2	1.99	0.01
63	1 mm	60°	3	3.1	-0.1
64	1 mm	60°	4	4.24	-0.24
65	1 mm	60°	5	4.95	0.05
66	1 mm	60°	6	5.77	0.23
67	1 mm	60°	7	6.86	0.14
68	1 mm	60°	8	7.79	0.21
69	1 mm	60°	9	8.84	0.16
70	1 mm	60°	10	9.84	0.16
71	1 mm	55°	1	0.96	0.04
72	1 mm	55°	2	1.87	0.13
73	1 mm	55°	3	3.03	-0.03
74	1 mm	55°	4	4.1	-0.1
75	1 mm	55°	5	4.95	0.05
76	1 mm	55°	6	5.77	0.23
77	1 mm	55°	7	6.62	0.38
78	1 mm	55°	8	7.66	0.34
79	1 mm	55°	9	8.65	0.35
80	1 mm	55°	10	9.67	0.33
81	1 mm	50°	1	0.93	0.07
82	1 mm	50°	2	1.81	0.19
83	1 mm	50°	3	2.97	0.03
84	1 mm	50°	4	4.15	-0.15

Nº	Patrón	Ángulo	Medida Real (d1)	Medida Obtenida (d2)	Error (d1-d2)
85	1 mm	50°	5	4.86	0.14
86	1 mm	50°	6	5.58	0.42
87	1 mm	50°	7	6.53	0.47
88	1 mm	50°	8	7.58	0.42
89	1 mm	50°	9	8.53	0.47
90	1 mm	50°	10	9.44	0.56
91	1 mm	45°	1	0.98	0.02
92	1 mm	45°	2	1.81	0.19
93	1 mm	45°	3	2.93	0.07
94	1 mm	45°	4	4.19	-0.19
95	1 mm	45°	5	4.89	0.11
96	1 mm	45°	6	5.51	0.49
97	1 mm	45°	7	6.7	0.3
98	1 mm	45°	8	7.42	0.58
99	1 mm	45°	9	8.46	0.54
100	1 mm	45°	10	9.3	0.7
101	2 mm	90°	1	0.98	0.02
102	2 mm	90°	2	2.03	-0.03
103	2 mm	90°	3	3.15	-0.15
104	2 mm	90°	4	4.23	-0.23
105	2 mm	90°	5	5.04	-0.04
106	2 mm	90°	6	5.95	0.05
107	2 mm	90°	7	6.99	0.01
108	2 mm	90°	8	7.94	0.06
109	2 mm	90°	9	8.91	0.09
110	2 mm	90°	10	9.75	0.25
111	2 mm	85°	1	1.02	-0.02
112	2 mm	85°	2	2.01	-0.01
113	2 mm	85°	3	3.13	-0.13
114	2 mm	85°	4	4.08	-0.08
115	2 mm	85°	5	5.16	-0.16
116	2 mm	85°	6	5.83	0.17
117	2 mm	85°	7	6.78	0.22
118	2 mm	85°	8	7.95	0.05
119	2 mm	85°	9	9.01	-0.01
120	2 mm	85°	10	9.88	0.12
121	2 mm	80°	1	0.94	0.06
122	2 mm	80°	2	2.01	-0.01
123	2 mm	80°	3	3.18	-0.18
124	2 mm	80°	4	4.18	-0.18
125	2 mm	80°	5	5.06	-0.06
126	2 mm	80°	6	5.77	0.23
127	2 mm	80°	7	6.97	0.03
128	2 mm	80°	8	8.02	-0.02

Nº	Patrón	Ángulo	Medida Real (d1)	Medida Obtenida (d2)	Error (d1-d2)
129	2 mm	80°	9	8.99	0.01
130	2 mm	80°	10	10.12	-0.12
131	2 mm	75°	1	1.03	-0.03
132	2 mm	75°	2	2.02	-0.02
133	2 mm	75°	3	3.13	-0.13
134	2 mm	75°	4	4.22	-0.22
135	2 mm	75°	5	5.12	-0.12
136	2 mm	75°	6	5.84	0.16
137	2 mm	75°	7	6.75	0.25
138	2 mm	75°	8	7.99	0.01
139	2 mm	75°	9	8.91	0.09
140	2 mm	75°	10	9.87	0.13
141	2 mm	70°	1	0.93	0.07
142	2 mm	70°	2	1.87	0.13
143	2 mm	70°	3	2.98	0.02
144	2 mm	70°	4	4.02	-0.02
145	2 mm	70°	5	4.97	0.03
146	2 mm	70°	6	5.72	0.28
147	2 mm	70°	7	6.43	0.57
148	2 mm	70°	8	7.86	0.14
149	2 mm	70°	9	8.74	0.26
150	2 mm	70°	10	9.73	0.27
151	2 mm	65°	1	1.04	-0.04
152	2 mm	65°	2	1.94	0.06
153	2 mm	65°	3	3.11	-0.11
154	2 mm	65°	4	4.06	-0.06
155	2 mm	65°	5	5.28	-0.28
156	2 mm	65°	6	5.77	0.23
157	2 mm	65°	7	6.73	0.27
158	2 mm	65°	8	7.87	0.13
159	2 mm	65°	9	8.86	0.14
160	2 mm	65°	10	9.77	0.23
161	2 mm	60°	1	0.9	0.1
162	2 mm	60°	2	1.85	0.15
163	2 mm	60°	3	3.06	-0.06
164	2 mm	60°	4	3.89	0.11
165	2 mm	60°	5	4.96	0.04
166	2 mm	60°	6	5.66	0.34
167	2 mm	60°	7	6.51	0.49
168	2 mm	60°	8	7.69	0.31
169	2 mm	60°	9	8.51	0.49
170	2 mm	60°	10	9.66	0.34
171	2 mm	55°	1	1.1	-0.1
172	2 mm	55°	2	1.86	0.14

Nº	Patrón	Ángulo	Medida Real (d1)	Medida Obtenida (d2)	Error (d1-d2)
173	2 mm	55°	3	3.12	-0.12
174	2 mm	55°	4	3.89	0.11
175	2 mm	55°	5	4.96	0.04
176	2 mm	55°	6	5.9	0.1
177	2 mm	55°	7	6.54	0.46
178	2 mm	55°	8	7.94	0.06
179	2 mm	55°	9	8.74	0.26
180	2 mm	55°	10	9.71	0.29
181	2 mm	50°	1	0.9	0.1
182	2 mm	50°	2	1.73	0.27
183	2 mm	50°	3	2.98	0.02
184	2 mm	50°	4	3.78	0.22
185	2 mm	50°	5	4.95	0.05
186	2 mm	50°	6	5.47	0.53
187	2 mm	50°	7	6.29	0.71
188	2 mm	50°	8	7.54	0.46
189	2 mm	50°	9	8.41	0.59
190	2 mm	50°	10	9.51	0.49
191	2 mm	45°	1	1.02	-0.02
192	2 mm	45°	2	2.02	-0.02
193	2 mm	45°	3	3.06	-0.06
194	2 mm	45°	4	4.17	-0.17
195	2 mm	45°	5	5.27	-0.27
196	2 mm	45°	6	6.25	-0.25
197	2 mm	45°	7	6.73	0.27
198	2 mm	45°	8	8.16	-0.16
199	2 mm	45°	9	9.06	-0.06
200	2 mm	45°	10	10.65	-0.65
201	3 mm	90°	1	1.02	-0.02
202	3 mm	90°	2	1.98	0.02
203	3 mm	90°	3	3.05	-0.05
204	3 mm	90°	4	4.32	-0.32
205	3 mm	90°	5	5.09	-0.09
206	3 mm	90°	6	6.06	-0.06
207	3 mm	90°	7	7.06	-0.06
208	3 mm	90°	8	8.1	-0.1
209	3 mm	90°	9	9.21	-0.21
210	3 mm	90°	10	10.11	-0.11
211	3 mm	85°	1	0.99	0.01
212	3 mm	85°	2	2	0
213	3 mm	85°	3	3.08	-0.08
214	3 mm	85°	4	4.02	-0.02
215	3 mm	85°	5	5.03	-0.03
216	3 mm	85°	6	5.81	0.19

Nº	Patrón	Ángulo	Medida Real (d1)	Medida Obtenida (d2)	Error (d1-d2)
217	3 mm	85°	7	6.88	0.12
218	3 mm	85°	8	8.13	-0.13
219	3 mm	85°	9	9.07	-0.07
220	3 mm	85°	10	10.2	-0.2
221	3 mm	80°	1	0.99	0.01
222	3 mm	80°	2	1.94	0.06
223	3 mm	80°	3	3.16	-0.16
224	3 mm	80°	4	4.12	-0.12
225	3 mm	80°	5	5.05	-0.05
226	3 mm	80°	6	5.76	0.24
227	3 mm	80°	7	6.89	0.11
228	3 mm	80°	8	8.08	-0.08
229	3 mm	80°	9	9.13	-0.13
230	3 mm	80°	10	9.88	0.12
231	3 mm	75°	1	1.05	-0.05
232	3 mm	75°	2	2	0
233	3 mm	75°	3	3.07	-0.07
234	3 mm	75°	4	4.17	-0.17
235	3 mm	75°	5	5.07	-0.07
236	3 mm	75°	6	5.85	0.15
237	3 mm	75°	7	6.82	0.18
238	3 mm	75°	8	7.8	0.2
239	3 mm	75°	9	9.09	-0.09
240	3 mm	75°	10	9.98	0.02
241	3 mm	70°	1	1.1	-0.1
242	3 mm	70°	2	1.98	0.02
243	3 mm	70°	3	3.12	-0.12
244	3 mm	70°	4	4.15	-0.15
245	3 mm	70°	5	5.06	-0.06
246	3 mm	70°	6	6.05	-0.05
247	3 mm	70°	7	6.85	0.15
248	3 mm	70°	8	8.06	-0.06
249	3 mm	70°	9	9.08	-0.08
250	3 mm	70°	10	10.02	-0.02
251	3 mm	65°	1	0.99	0.01
252	3 mm	65°	2	1.84	0.16
253	3 mm	65°	3	3.05	-0.05
254	3 mm	65°	4	4.07	-0.07
255	3 mm	65°	5	4.9	0.1
256	3 mm	65°	6	5.81	0.19
257	3 mm	65°	7	6.56	0.44
258	3 mm	65°	8	7.77	0.23
259	3 mm	65°	9	8.73	0.27
260	3 mm	65°	10	9.66	0.34

Nº	Patrón	Ángulo	Medida Real (d1)	Medida Obtenida (d2)	Error (d1-d2)
261	3 mm	60°	1	1.03	-0.03
262	3 mm	60°	2	1.93	0.07
263	3 mm	60°	3	2.92	0.08
264	3 mm	60°	4	4.06	-0.06
265	3 mm	60°	5	4.95	0.05
266	3 mm	60°	6	5.89	0.11
267	3 mm	60°	7	6.7	0.3
268	3 mm	60°	8	7.27	0.73
269	3 mm	60°	9	9.02	-0.02
270	3 mm	60°	10	10.02	-0.02
271	3 mm	55°	1	1.09	-0.09
272	3 mm	55°	2	1.88	0.12
273	3 mm	55°	3	3.13	-0.13
274	3 mm	55°	4	4.07	-0.07
275	3 mm	55°	5	4.56	0.44
276	3 mm	55°	6	5.82	0.18
277	3 mm	55°	7	6.58	0.42
278	3 mm	55°	8	7.62	0.38
279	3 mm	55°	9	8.65	0.35
280	3 mm	55°	10	9.67	0.33
281	3 mm	50°	1	1.15	-0.15
282	3 mm	50°	2	2.18	-0.18
283	3 mm	50°	3	3.53	-0.53
284	3 mm	50°	4	4.52	-0.52
285	3 mm	50°	5	5.4	-0.4
286	3 mm	50°	6	6.49	-0.49
287	3 mm	50°	7	7.35	-0.35
288	3 mm	50°	8	8.85	-0.85
289	3 mm	50°	9	9.99	-0.99
290	3 mm	50°	10	10.62	-0.62
291	3 mm	45°	1	1.01	-0.01
292	3 mm	45°	2	1.82	0.18
293	3 mm	45°	3	2.61	0.39
294	3 mm	45°	4	3.51	0.49
295	3 mm	45°	5	4.91	0.09
296	3 mm	45°	6	5.81	0.19
297	3 mm	45°	7	6.61	0.39
298	3 mm	45°	8	6.85	1.15
299	3 mm	45°	9	8.59	0.41
300	3 mm	45°	10	9.25	0.75
301	4 mm	90°	1	1.05	-0.05
302	4 mm	90°	2	2.05	-0.05
303	4 mm	90°	3	3.04	-0.04
304	4 mm	90°	4	4.09	-0.09

Nº	Patrón	Ángulo	Medida Real (d1)	Medida Obtenida (d2)	Error (d1-d2)
305	4 mm	90°	5	4.98	0.02
306	4 mm	90°	6	5.88	0.12
307	4 mm	90°	7	6.77	0.23
308	4 mm	90°	8	7.93	0.07
309	4 mm	90°	9	8.91	0.09
310	4 mm	90°	10	9.91	0.09
311	4 mm	85°	1	1.07	-0.07
312	4 mm	85°	2	1.99	0.01
313	4 mm	85°	3	3.08	-0.08
314	4 mm	85°	4	4.13	-0.13
315	4 mm	85°	5	4.98	0.02
316	4 mm	85°	6	5.88	0.12
317	4 mm	85°	7	6.66	0.34
318	4 mm	85°	8	8.01	-0.01
319	4 mm	85°	9	8.93	0.07
320	4 mm	85°	10	10.07	-0.07
321	4 mm	80°	1	0.97	0.03
322	4 mm	80°	2	1.98	0.02
323	4 mm	80°	3	3.03	-0.03
324	4 mm	80°	4	4	0
325	4 mm	80°	5	4.95	0.05
326	4 mm	80°	6	5.91	0.09
327	4 mm	80°	7	6.81	0.19
328	4 mm	80°	8	8.08	-0.08
329	4 mm	80°	9	8.83	0.17
330	4 mm	80°	10	9.86	0.14
331	4 mm	75°	1	0.95	0.05
332	4 mm	75°	2	1.95	0.05
333	4 mm	75°	3	3.1	-0.1
334	4 mm	75°	4	4.19	-0.19
335	4 mm	75°	5	4.97	0.03
336	4 mm	75°	6	5.7	0.3
337	4 mm	75°	7	7.02	-0.02
338	4 mm	75°	8	7.95	0.05
339	4 mm	75°	9	8.97	0.03
340	4 mm	75°	10	10.14	-0.14
341	4 mm	70°	1	1	0
342	4 mm	70°	2	1.96	0.04
343	4 mm	70°	3	3.18	-0.18
344	4 mm	70°	4	4.17	-0.17
345	4 mm	70°	5	5.08	-0.08
346	4 mm	70°	6	5.92	0.08
347	4 mm	70°	7	6.97	0.03
348	4 mm	70°	8	8.04	-0.04

Nº	Patrón	Ángulo	Medida Real (d1)	Medida Obtenida (d2)	Error (d1-d2)
349	4 mm	70°	9	9.15	-0.15
350	4 mm	70°	10	9.83	0.17
351	4 mm	65°	1	1.06	-0.06
352	4 mm	65°	2	1.92	0.08
353	4 mm	65°	3	3.07	-0.07
354	4 mm	65°	4	4.15	-0.15
355	4 mm	65°	5	5.03	-0.03
356	4 mm	65°	6	5.69	0.31
357	4 mm	65°	7	6.83	0.17
358	4 mm	65°	8	8.03	-0.03
359	4 mm	65°	9	9.01	-0.01
360	4 mm	65°	10	10.08	-0.08
361	4 mm	60°	1	1	0
362	4 mm	60°	2	1.91	0.09
363	4 mm	60°	3	2.95	0.05
364	4 mm	60°	4	4.13	-0.13
365	4 mm	60°	5	5.08	-0.08
366	4 mm	60°	6	5.9	0.1
367	4 mm	60°	7	6.8	0.2
368	4 mm	60°	8	8.1	-0.1
369	4 mm	60°	9	9.1	-0.1
370	4 mm	60°	10	10.02	-0.02
371	4 mm	55°	1	1.02	-0.02
372	4 mm	55°	2	1.96	0.04
373	4 mm	55°	3	3.15	-0.15
374	4 mm	55°	4	4.31	-0.31
375	4 mm	55°	5	4.9	0.1
376	4 mm	55°	6	5.9	0.1
377	4 mm	55°	7	6.78	0.22
378	4 mm	55°	8	8.02	-0.02
379	4 mm	55°	9	9.17	-0.17
380	4 mm	55°	10	10.08	-0.08
381	4 mm	50°	1	1.13	-0.13
382	4 mm	50°	2	1.8	0.2
383	4 mm	50°	3	3.16	-0.16
384	4 mm	50°	4	4.16	-0.16
385	4 mm	50°	5	5.01	-0.01
386	4 mm	50°	6	5.89	0.11
387	4 mm	50°	7	6.74	0.26
388	4 mm	50°	8	8.01	-0.01
389	4 mm	50°	9	9.11	-0.11
390	4 mm	50°	10	9.88	0.12
391	4 mm	45°	1	1.07	-0.07
392	4 mm	45°	2	1.93	0.07

Nº	Patrón	Ángulo	Medida Real (d1)	Medida Obtenida (d2)	Error (d1-d2)
393	4 mm	45°	3	2.98	0.02
394	4 mm	45°	4	3.94	0.06
395	4 mm	45°	5	4.99	0.01
396	4 mm	45°	6	5.86	0.14
397	4 mm	45°	7	6.61	0.39
398	4 mm	45°	8	7.84	0.16
399	4 mm	45°	9	8.82	0.18
400	4 mm	45°	10	9.76	0.24
401	5 mm	90°	1	1.04	-0.04
402	5 mm	90°	2	1.93	0.07
403	5 mm	90°	3	3.13	-0.13
404	5 mm	90°	4	4.15	-0.15
405	5 mm	90°	5	4.99	0.01
406	5 mm	90°	6	5.83	0.17
407	5 mm	90°	7	6.73	0.27
408	5 mm	90°	8	8.02	-0.02
409	5 mm	90°	9	8.9	0.1
410	5 mm	90°	10	9.83	0.17
411	5 mm	85°	1	0.98	0.02
412	5 mm	85°	2	2.06	-0.06
413	5 mm	85°	3	3.12	-0.12
414	5 mm	85°	4	4.08	-0.08
415	5 mm	85°	5	5	0
416	5 mm	85°	6	6.06	-0.06
417	5 mm	85°	7	6.83	0.17
418	5 mm	85°	8	7.9	0.1
419	5 mm	85°	9	9.04	-0.04
420	5 mm	85°	10	9.84	0.16
421	5 mm	80°	1	1.02	-0.02
422	5 mm	80°	2	1.93	0.07
423	5 mm	80°	3	3.16	-0.16
424	5 mm	80°	4	4.1	-0.1
425	5 mm	80°	5	5.04	-0.04
426	5 mm	80°	6	5.82	0.18
427	5 mm	80°	7	6.81	0.19
428	5 mm	80°	8	7.97	0.03
429	5 mm	80°	9	9.01	-0.01
430	5 mm	80°	10	10.05	-0.05
431	5 mm	75°	1	1.09	-0.09
432	5 mm	75°	2	1.99	0.01
433	5 mm	75°	3	3.11	-0.11
434	5 mm	75°	4	4.04	-0.04
435	5 mm	75°	5	5	0
436	5 mm	75°	6	5.94	0.06

Nº	Patrón	Ángulo	Medida Real (d1)	Medida Obtenida (d2)	Error (d1-d2)
437	5 mm	75°	7	6.75	0.25
438	5 mm	75°	8	7.9	0.1
439	5 mm	75°	9	8.9	0.1
440	5 mm	75°	10	10.01	-0.01
441	5 mm	70°	1	1.19	-0.19
442	5 mm	70°	2	2.05	-0.05
443	5 mm	70°	3	3.15	-0.15
444	5 mm	70°	4	4.23	-0.23
445	5 mm	70°	5	5.01	-0.01
446	5 mm	70°	6	5.96	0.04
447	5 mm	70°	7	6.63	0.37
448	5 mm	70°	8	7.94	0.06
449	5 mm	70°	9	8.98	0.02
450	5 mm	70°	10	9.94	0.06
451	5 mm	65°	1	0.98	0.02
452	5 mm	65°	2	1.99	0.01
453	5 mm	65°	3	3.06	-0.06
454	5 mm	65°	4	4.18	-0.18
455	5 mm	65°	5	5.08	-0.08
456	5 mm	65°	6	5.93	0.07
457	5 mm	65°	7	6.68	0.32
458	5 mm	65°	8	8.01	-0.01
459	5 mm	65°	9	9.18	-0.18
460	5 mm	65°	10	10.1	-0.1
461	5 mm	60°	1	1.05	-0.05
462	5 mm	60°	2	2.13	-0.13
463	5 mm	60°	3	3.43	-0.43
464	5 mm	60°	4	4.29	-0.29
465	5 mm	60°	5	5.49	-0.49
466	5 mm	60°	6	6.26	-0.26
467	5 mm	60°	7	7.03	-0.03
468	5 mm	60°	8	8.43	-0.43
469	5 mm	60°	9	9.5	-0.5
470	5 mm	60°	10	10.53	-0.53
471	5 mm	55°	1	1.23	-0.23
472	5 mm	55°	2	2.18	-0.18
473	5 mm	55°	3	3.55	-0.55
474	5 mm	55°	4	4.33	-0.33
475	5 mm	55°	5	5.59	-0.59
476	5 mm	55°	6	6.49	-0.49
477	5 mm	55°	7	7.57	-0.57
478	5 mm	55°	8	8.82	-0.82
479	5 mm	55°	9	9.79	-0.79
480	5 mm	55°	10	10.97	-0.97

Nº	Patrón	Ángulo	Medida Real (d1)	Medida Obtenida (d2)	Error (d1-d2)
481	5 mm	50°	1	1.07	-0.07
482	5 mm	50°	2	2.07	-0.07
483	5 mm	50°	3	3.14	-0.14
484	5 mm	50°	4	4.39	-0.39
485	5 mm	50°	5	5.37	-0.37
486	5 mm	50°	6	6.23	-0.23
487	5 mm	50°	7	7.39	-0.39
488	5 mm	50°	8	8.56	-0.56
489	5 mm	50°	9	9.55	-0.55
490	5 mm	50°	10	10.61	-0.61
491	5 mm	45°	1	1.12	-0.12
492	5 mm	45°	2	1.94	0.06
493	5 mm	45°	3	3.17	-0.17
494	5 mm	45°	4	3.91	0.09
495	5 mm	45°	5	5.03	-0.03
496	5 mm	45°	6	5.77	0.23
497	5 mm	45°	7	6.68	0.32
498	5 mm	45°	8	8.01	-0.01
499	5 mm	45°	9	8.92	0.08
500	5 mm	45°	10	9.9	0.1

## ANEXO 06

Tabla a

Desviación Estándar de las Medidas Obtenidas con el Sistema Propuesto, Patrón 2 mm

$\alpha$	Patrón	$\bar{e}$	$\sigma$
90	2 mm	0.003	0.131
85	2 mm	0.015	0.125
80	2 mm	-0.024	0.122
75	2 mm	0.012	0.146
70	2 mm	0.175	0.177
65	2 mm	0.057	0.177
60	2 mm	0.231	0.190
55	2 mm	0.124	0.177
50	2 mm	0.344	0.244
45	2 mm	-0.139	0.236

Nota. Elaboración propia.

Tabla b

Desviación Estándar de las Medidas Obtenidas con el Sistema Propuesto. Patrón 3 mm

$\alpha$	Patrón	$\bar{e}$	$\sigma$
90	3 mm	-0.1	0.098
85	3 mm	-0.021	0.113
80	3 mm	-1.11022E-16	0.131
75	3 mm	0.01	0.126
70	3 mm	-0.047	0.084
65	3 mm	0.162	0.167
60	3 mm	0.121	0.238
55	3 mm	0.193	0.224
50	3 mm	-0.508	0.266
45	3 mm	0.403	0.342

Nota. Elaboración propia.

Tabla c

Desviación Estándar de las Medidas Obtenidas con el Sistema Propuesto, Patrón 4 mm

$\alpha$	Patrón	$\bar{e}$	$\sigma$
90	4 mm	0.039	0.099
85	4 mm	0.02	0.135
80	4 mm	0.058	0.088
75	4 mm	0.006	0.135
70	4 mm	-0.03	0.116
65	4 mm	0.013	0.137
60	4 mm	0.001	0.108
55	4 mm	-0.029	0.155
50	4 mm	0.011	0.154
45	4 mm	0.12	0.132

Nota. Elaboración propia.

Tabla d

Desviación Estándar de las Medidas Obtenidas con el Sistema Propuesto, Patrón 5 mm

$\alpha$	Patrón	$\bar{e}$	$\sigma$
90	5 mm	0.045	0.136
85	5 mm	0.009	0.102
80	5 mm	0.009	0.112
75	5 mm	0.027	0.106
70	5 mm	-0.008	0.170
65	5 mm	-0.019	0.145
60	5 mm	-0.314	0.191
55	5 mm	-0.552	0.258
50	5 mm	-0.338	0.203
45	5 mm	0.055	0.148

Nota. Elaboración propia.

## ANEXO 07

Tabla a

Desviación Estándar de las Medidas Obtenidas con el Sistema Propuesto, Patrón 2 mm

<b>Medida Objetivo</b>	$\bar{e}$	$\sigma$
1 mm	0.014	0.067
2 mm	0.066	0.102
3 mm	-0.090	0.068
4 mm	-0.052	0.156
5 mm	-0.077	0.126
6 mm	0.184	0.203
7 mm	0.328	0.227
8 mm	0.104	0.174
9 mm	0.186	0.215
10 mm	0.135	0.319

Nota. Elaboración propia.

Tabla b

Desviación Estándar de las Medidas Obtenidas con el Sistema Propuesto, Patrón 3 mm

<b>Medida Objetivo</b>	$\bar{e}$	$\sigma$
1 mm	-0.042	0.055
2 mm	0.045	0.102
3 mm	-0.072	0.226
4 mm	-0.101	0.256
5 mm	-0.002	0.209
6 mm	0.065	0.220
7 mm	0.170	0.243
8 mm	0.147	0.541
9 mm	-0.056	0.393
10 mm	0.059	0.366

Nota. Elaboración propia.

Tabla c

Desviación Estándar de las Medidas Obtenidas con el Sistema Propuesto. Patrón 4 mm

<b>Medida Objetivo</b>	$\bar{e}$	$\sigma$
1 mm	-0.032	0.054
2 mm	0.055	0.065
3 mm	-0.074	0.076
4 mm	-0.127	0.102
5 mm	0.003	0.056
6 mm	0.147	0.085
7 mm	0.201	0.124
8 mm	-0.001	0.076
9 mm	0.000	0.129
10 mm	0.037	0.130

Nota. Elaboración propia.

Tabla d

Desviación Estándar de las Medidas Obtenidas con el Sistema Propuesto. Patrón 5 mm

<b>Medida Objetivo</b>	$\bar{e}$	$\sigma$
1 mm	-0.077	0.083
2 mm	-0.027	0.086
3 mm	-0.202	0.157
4 mm	-0.170	0.145
5 mm	-0.160	0.231
6 mm	-0.029	0.231
7 mm	0.090	0.323
8 mm	-0.156	0.325
9 mm	-0.177	0.320
10 mm	-0.178	0.388

Nota. Elaboración propia.

## ANEXO 08

Tabla a

Desviación Estándar de las Medidas Obtenidas con el Sistema Propuesto. Objetivo 2 mm

$\alpha$	$\bar{e}$	$\sigma$
45	0.096	0.088
50	0.082	0.195
55	0.050	0.135
60	0.038	0.106
65	0.070	0.057
70	0.044	0.067
75	0.012	0.026
80	0.038	0.033
85	0.004	0.050
90	-0.004	0.049

Nota. Elaboración propia

Tabla b

Desviación Estándar de las Medidas Obtenidas con el Sistema Propuesto. Objetivo 3 mm

$\alpha$	$\bar{e}$	$\sigma$
45	0.050	0.211
50	-0.156	0.227
55	-0.196	0.203
60	-0.092	0.203
65	-0.074	0.023
70	-0.096	0.081
75	-0.104	0.022
80	-0.110	0.078
85	-0.112	0.031
90	-0.114	0.068

Nota. Elaboración propia

Tabla c

Desviación Estándar de las Medidas Obtenidas con el Sistema Propuesto. Objetivo 4 mm

$\alpha$	$\bar{e}$	$\sigma$
45	0.056	0.274
50	-0.200	0.282
55	-0.140	0.183
60	-0.122	0.158
65	-0.138	0.073
70	-0.146	0.077
75	-0.160	0.070
80	-0.084	0.074
85	-0.082	0.040
90	-0.186	0.090

Nota. Elaboración propia

Tabla d

Desviación Estándar de las Medidas Obtenidas con el Sistema Propuesto. Objetivo 5 mm

$\alpha$	$\bar{e}$	$\sigma$
45	-0.018	0.152
50	-0.118	0.250
55	0.008	0.373
60	-0.086	0.232
65	-0.054	0.143
70	-0.022	0.047
75	-0.060	0.074
80	-0.022	0.044
85	-0.026	0.079
90	-0.018	0.047

Nota. Elaboración propia

Tabla e

Desviación Estándar de las Medidas Obtenidas con el Sistema Propuesto. Objetivo 6 mm

$\alpha$	$\bar{e}$	$\sigma$
45	0.160	0.266
50	0.068	0.430
55	0.024	0.293
60	0.104	0.226
65	0.194	0.088
70	0.090	0.121
75	0.158	0.088
80	0.174	0.064
85	0.098	0.100
90	0.076	0.087

Nota. Elaboración propia

Tabla f

Desviación Estándar de las Medidas Obtenidas con el Sistema Propuesto. Objetivo 7 mm

$\alpha$	$\bar{e}$	$\sigma$
45	0.334	0.054
50	0.140	0.492
55	0.182	0.430
60	0.220	0.193
65	0.286	0.102
70	0.288	0.208
75	0.188	0.122
80	0.138	0.069
85	0.214	0.082
90	0.128	0.145

Nota. Elaboración propia

Tabla g

Desviación Estándar de las Medidas Obtenidas con el Sistema Propuesto. Objetivo 8 mm

$\alpha$	$\bar{e}$	$\sigma$
45	0.344	0.529
50	-0.108	0.584
55	-0.012	0.484
60	0.144	0.437
65	0.092	0.110
70	0.036	0.084
75	0.092	0.071
80	-0.016	0.067
85	0.000	0.086
90	-0.014	0.078

Nota. Elaboración propia

Tabla h

Desviación Estándar de las Medidas Obtenidas con el Sistema Propuesto. Objetivo 9 mm

$\alpha$	$\bar{e}$	$\sigma$
45	0.230	0.244
50	-0.118	0.670
55	0.000	0.491
60	0.006	0.363
65	0.058	0.168
70	0.036	0.164
75	0.028	0.076
80	0.016	0.108
85	-0.008	0.053
90	0.014	0.132

Nota. Elaboración propia

Tabla i

Desviación Estándar de las Medidas Obtenidas con el Sistema Propuesto. Objetivo 10 mm

$\alpha$	$\bar{\epsilon}$	$\sigma$
45	0.228	0.566
50	-0.012	0.575
55	-0.020	0.558
60	-0.014	0.325
65	0.116	0.196
70	0.128	0.111
75	0.012	0.100
80	0.038	0.116
85	0.020	0.151
90	0.076	0.144

Nota. Elaboración propia

