

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTÍSIMA CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



UCSC

Desarrollo de sistema óptico portable para análisis de movimiento microscópico

Daniel Alejandro Nusdel Neira

Informe de Habilitación Profesional para optar al título de:
Ingeniero Civil Eléctrico

Profesor Patrocinante:
Dr. Jaime Cariñe C.

Comisión:
Dra. Silvia Restrepo M.
Dr. Samuel Vergara R.

Concepción, agosto de 2023

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTISIMA CONCEPCION
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Profesor Patrocinante:
Dr. Jaime Cariñe Catrileo

Desarrollo de sistema óptico portable para análisis de movimiento microscópico.

Daniel Alejandro Nusdel Neira

Informe de Habilitación Profesional
para optar al Título de

Ingeniero Civil Eléctrico

Agosto de 2023

Resumen

El presente trabajo se enfoca en la detección de movilidad microscópica mediante sistemas ópticos. El objetivo principal de esta investigación es desarrollar un sistema óptico portable que emplee fibra óptica para transmitir la luz de manera gaussiana reemplazando los sistemas ópticos que utilizan lentes y espejos para redireccionar y expandir el haz luz.

Para lograr este objetivo, se ha desarrollado un sistema óptico portable y se ha evaluado en diferentes sectores utilizando algoritmos de procesamiento de imágenes. Los resultados obtenidos han demostrado que el uso de fibra óptica permite que el sistema óptico funcione sin la necesidad de lentes y espejos. Donde los algoritmos de procesamiento DJC y NDJC han mostrado una alta precisión en la detección de movilidad microscópica, con valores de precisión 0.97 y 0.96 respectivamente.

A través de un estudio gravimétrico se ha evaluado la portabilidad del sistema óptico en distintos sectores, donde se correlacionó el peso y el promedio de actividad presente en una muestra, obteniendo resultados de un 97% de correlación para los sectores evaluados mediante algoritmos DJC y NDJC, con este estudio gravimétrico se determinó que el sistema es portable.

A los alumnos del pasado, presente y futuro de la carrera de Ingeniería Civil Eléctrica de la U.C.S.C.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mis queridos padres, quienes siempre han brindado lo mejor de sí para apoyarme en cada decisión que he tomado. Gracias a su constante apoyo, valores inculcados y dedicación he logrado desarrollarme como mejor persona tanto dentro como fuera de mi formación universitaria.

Quiero agradecer al Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (Fondecyt N11201348) por su financiamiento para el proyecto.

También deseo agradecer a mis amigos, quienes han estado a mi lado en todo momento, brindándome su apoyo, consejos y su amistad tanto dentro como fuera de la universidad. Juntos hemos celebrado éxitos y superado adversidades. Les agradezco de corazón por estar siempre presentes.

Asimismo, quiero agradecer al Dr. Jaime Cariñe, quien me brindó la oportunidad de trabajar en su área de especialización y las instalaciones del laboratorio optoelectrónica. Su asesoramiento durante el proyecto fue fundamental para alcanzar los resultados esperados en esta tesis.

Por último, pero no menos importante, quiero expresar mi gratitud al cuerpo académico del departamento de Ingeniería Civil Eléctrica. Su excelencia en la enseñanza y su dedicación hacia nuestros aprendizajes han sido fundamentales para mi desarrollo personal y académico. Les agradezco por brindarme una formación excepcional que me ha preparado para enfrentar los desafíos futuros.

Tabla de Contenidos

LISTA DE TABLAS	VIII
LISTA DE FIGURAS	IX
ABREVIACIONES	XI
CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.2. TRABAJOS PREVIOS.	1
1.2.1. DISCUSIÓN.	3
1.3. HIPÓTESIS DE TRABAJO.	4
1.4. OBJETIVO GENERAL.	4
1.5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.	4
1.6. ALCANCES Y LIMITACIONES.	5
1.7. METODOLOGÍA.	5
CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO	6
2.1. INTRODUCCIÓN.	6
2.2. LUZ LÁSER.	6
2.3. FIBRA ÓPTICA COMO MEDIO DE TRANSMISIÓN DE LUZ.	7
2.4. DETECCIÓN DE LUZ.	9
2.5. INTERFERENCIA ÓPTICA.	11
CAPITULO 3. SPECKLE DINÁMICO: PROCESAMIENTO Y SISTEMAS	13
3.1 PATRÓN DE SPECKLE DINÁMICO.	13
3.2 ALGORITMOS DE PROCESAMIENTO DE IMÁGENES.	13
3.2.1 ALGORITMOS NO NORMALIZADOS.	15
3.2.2 ALGORITMOS NORMALIZADOS.	17
3.3 SISTEMAS ÓPTICOS PREVIOS PARA ANÁLISIS DE SPECKLE.	20
3.4 DISPOSITIVOS COMERCIALES.	23
3.5 DISCUSIÓN Y PROPUESTA DE DISEÑO.	24
CAPITULO 4. DESARROLLO DE DISPOSITIVO ÓPTICO PORTABLE	25
4.1 ESQUEMA Y COMPONENTES DEL DISPOSITIVO.	25
4.2 CONFIGURACIÓN DE CÁMARA MEDIANTE SOFTWARE PYLON VIEWER.	30
4.3 PRUEBAS DE ILUMINACIÓN.	33
4.4 PRUEBAS DE SECADO DE PINTURA.	36
4.5 MÉTRICA DE PRECISIÓN EN DETECCIÓN DE MOVILIDAD.	39
CAPITULO 5. EVALUACIÓN DE MICRO ACTIVIDAD CON SISTEMA ÓPTICO PORTABLE	42
5.1 DESARROLLO DE ESTUDIO GRAVIMÉTRICO.	42
5.2 RESULTADOS OBTENIDOS PARA PRIMER SECTOR DEL LABORATORIO.	43
5.2.1 PERFIL DE MOVILIDAD MICROSCÓPICA.	44
5.2.2 PROMEDIO DE ACTIVIDAD EN LA MUESTRA.	45
5.2.3 CORRELACIÓN ENTRE PESO Y ACTIVIDAD MICROSCÓPICA.	47
5.3 RESULTADOS OBTENIDOS PARA SEGUNDO SECTOR DEL LABORATORIO.	48
5.3.1 PROMEDIO DE ACTIVIDAD EN LA MUESTRA.	48
5.3.2 CORRELACIÓN ENTRE PESO Y ACTIVIDAD MICROSCÓPICA.	50
5.4 DISCUSIÓN DE RESULTADOS.	50
CAPITULO 6. CONCLUSIONES.	52

6.1 CONCLUSIONES	52
6.2 TRABAJO FUTURO	53
BIBLIOGRAFÍA	54
ANEXO A	56
ANEXO B	57
ANEXO C.....	59

Lista de Tablas

TABLA 1:	ALGORITMOS DE PROCESAMIENTO DE IMÁGENES CUALITATIVOS	14
TABLA 2:	CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA.....	23
TABLA 3:	VARIACIÓN DE PESO EN LA MUESTRA. PRUEBA 1.	43
TABLA 4:	PROMEDIO DE ACTIVIDAD PRUEBA 1 (M1) PARA PRIMER SECTOR.....	45
TABLA 5:	PROMEDIO DE ACTIVIDAD PRUEBA 1 (M2) PARA PRIMER SECTOR.....	46
TABLA 6:	RESULTADOS DE CORRELACIÓN PRIMER SECTOR DEL LABORATORIO.	47
TABLA 7:	VARIACIÓN DE PESO EN LA MUESTRA. PRUEBA 1.	48
TABLA 8:	PROMEDIO DE ACTIVIDAD PARA SEGUNDO SECTOR DEL LABORATORIO.	49
TABLA 9:	PROMEDIO DE ACTIVIDAD PARA SEGUNDO SECTOR DEL LABORATORIO.	49
TABLA 10:	RESULTADOS DE CORRELACIÓN SEGUNDO SECTOR DEL LABORATORIO.....	50
TABLA 11:	PROMEDIO DE CORRELACIÓN OBTENIDO PARA PRIMER SECTOR DEL LABORATORIO.....	50
TABLA 12:	PROMEDIO DE CORRELACIÓN OBTENIDO PARA SEGUNDO SECTOR DEL LABORATORIO.	51

Lista de Figuras

FIG 1.	HAZ DE LUZ LÁSER.....	6
FIG 2.	PROCESOS DE LA LUZ ANTE UN MEDIO.....	7
FIG 3.	DISEÑO DE FIBRA ÓPTICA CONVENCIONAL.	7
FIG 4.	MODOS TRANSVERSALES ELECTROMAGNÉTICOS PARA LÁSERES.	8
FIG 5.	FUNCIONAMIENTO DE SENSOR CMOS ANTES DE CONVERSIÓN ANÁLOGO DIGITAL.	9
FIG 6.	ESQUEMA FUNCIONAMIENTO DE LA CÁMARA.....	10
FIG 7.	REPRESENTACIÓN DE LENTE DE CÁMARA	10
FIG 8.	ESQUEMA PLANO DE OBSERVACIÓN E INTERFERENCIA DE HACES DE LUZ.....	11
FIG 9.	COMPORTAMIENTO DE FUNCIÓN DE INTERFERENCIA.	12
FIG 10.	EJEMPLO PATRÓN SPECKLE SIMULADO MEDIANTE MATLAB.	13
FIG 11.	EFEECTO ESPERADO A PARTIR DE LA SIMULACIÓN.....	14
FIG 12.	ALGORITMO GD Y WGD OBTENIDOS A PARTIR DE SIMULACIÓN EN MATLAB.....	15
FIG 13.	ALGORITMO SF Y ALGORITMO MSF OBTENIDOS A PARTIR DE SIMULACIÓN EN MATLAB.	16
FIG 14.	APLICACIÓN DE ALGORITMO STD A SIMULACIÓN EN MATLAB.	16
FIG 15.	APLICACIÓN DE ALGORITMO DJC A SIMULACIÓN EN MATLAB.	17
FIG 16.	APLICACIÓN DE ALGORITMO LASCA A SIMULACIÓN EN MATLAB.	18
FIG 17.	APLICACIÓN DE ALGORITMO LSI A SIMULACIÓN EN MATLAB.....	18
FIG 18.	APLICACIÓN DE ALGORITMO FUJII A SIMULACIÓN EN MATLAB.	19
FIG 19.	APLICACIÓN DE ALGORITMO NDJC A SIMULACIÓN EN MATLAB.....	19
FIG 20.	SISTEMA ÓPTICO UTILIZADO EN [3].....	21
FIG 21.	SISTEMA ÓPTICO UTILIZADO EN [4].....	21
FIG 22.	SISTEMA ÓPTICO UTILIZADO EN [5].....	22
FIG 23.	SISTEMA ÓPTICO UTILIZADO EN [21].....	22
FIG 24.	SISTEMA ÓPTICO UTILIZADO EN [6].....	22
FIG 25.	RFLSI III DE RWB [22].....	24
FIG 26.	ESQUEMA DE SISTEMA PROPUESTO.	25
FIG 27.	DIODO LÁSER PRESENTE EN LABORATORIO.....	26
FIG 28.	CÁMARA CMOS A UTILIZAR.	26
FIG 29.	LENTE A UTILIZAR.	26
FIG 30.	CARACTERÍSTICAS DE BRAZO ARTICULADO.....	28
FIG 31.	EJEMPLO DE DIODO LÁSER Y FIBRA ÓPTICA.....	28
FIG 32.	DIODO LÁSER DESARMADO.....	29
FIG 33.	FUENTE DE PODER ELE-TECH MODELO HY3005B.	29
FIG 34.	FIBRA ÓPTICA P1-630PM-FC-2.....	29
FIG 35.	VISTA SUPERIOR Y FRONTAL DE LA CÁMARA.	30
FIG 36.1	VENTANA “DEVICES”. SOFTWARE PYLON VIEWER.	31

FIG 36.2	VENTANA “FEATURES”, SOFTWARE PYLON VIEWER.....	31
FIG 36.3	VENTANA “FEATURES”, SOFTWARE PYLON VIEWER.....	31
FIG 36.4	VENTANA “FEATURES”, SOFTWARE PYLON VIEWER.....	31
FIG 36.5	VENTANA “RECORDING SETTINGS”, SOFTWARE PYLON VIEWER.	32
FIG 36.6	EJEMPLO DE GUARDADO DE IMÁGENES.....	32
FIG 37.	SISTEMA ÓPTICO PORTABLE.....	33
FIG 38.	PERFIL DE ILUMINACIÓN OBTENIDO A PARTIR DE DIFERENTES ÁNGULOS DE APROXIMACIÓN.	34
FIG 39.	PERFIL DE ILUMINACIÓN OBTENIDO A PARTIR DEL SISTEMA ÓPTICO.	35
FIG 40.	CORRECTOR UTILIZADO.....	36
FIG 41.	PRUEBA DE SECADO DE PINTURA.	36
FIG 42.	PERFIL DE MOVILIDAD OBTENIDO MEDIANTE ALGORITMO DIFERENCIAS GENERALIZADAS.	37
FIG 43.	PERFIL DE MOVILIDAD OBTENIDO MEDIANTE ALGORITMO DJC.	37
FIG 44.	PERFIL DE MOVILIDAD OBTENIDO MEDIANTE ALGORITMO LSI.	37
FIG 45.	PERFIL DE MOVILIDAD OBTENIDO MEDIANTE ALGORITMO NDJC.	38
FIG 46.	PERFIL DE MOVILIDAD OBTENIDO MEDIANTE ALGORITMO FUJII.	38
FIG 47.	MÉTRICA DE PRECISIÓN DE DETECCIÓN DE MOVILIDAD APLICADA A AMBOS SECTORES DEL LABORATORIO.	39
FIG 48.	ANÁLISIS DE MÉTRICA DE PRECISIÓN EN AMBOS SECTORES DEL LABORATORIO.....	40
FIG 49.	COMPARACIÓN ENTRE MEJOR Y PEOR ALGORITMO POR SECTOR.	40
FIG 50.	BALANZA EXCELL BH3 - 300.	43
FIG 51.	PLACA DISEÑADA EN IMPRESIÓN 3D.....	43
FIG 52.	PRIMER SECTOR DE ENSAYO GRAVIMÉTRICO.	43
FIG 53.	COMPORTAMIENTO DE PERFIL DE ACTIVIDAD OBTENIDO MEDIANTE ALGORITMOS DJC Y NDJC.	44
FIG 54.	ÁREA DE TRABAJO POR ABARCAR EN M1.....	45
FIG 55.	ÁREA DE TRABAJO POR ABARCAR EN M2.....	45
FIG 56.	COMPORTAMIENTO DE PROMEDIO DE ACTIVIDAD EN FUNCIÓN DEL TIEMPO PARA SECTOR 1.	46
FIG 57.	GRAFICOS DE DISPERSIÓN.	47
FIG 58.	SEGUNDO SECTOR DE ENSAYO GRAVIMÉTRICO.	48
FIG 59.	COMPORTAMIENTO DE PROMEDIO DE ACTIVIDAD EN FUNCIÓN DEL TIEMPO PARA SECTOR 2.	49

Abreviaciones

Mayúsculas

HE-NE	: HELIO-NEÓN
CCD	: DISPOSITIVO DE CARGA ACOPLADA
CMOS	: SEMICONDUCTOR COMPLEMENTARIO DE ÓXIDO METÁLICO
GaAs	: ARSENIURO DE GALIO
TEM	: MODO TRANSVERSAL ELECTROMAGNÉTICO
AP	: APERTURA NUMÉRICA
GD	: DIFERENCIAS GENERALIZADAS
WGD	: DIFERENCIAS GENERALIZADAS PESADAS
SF	: FUNCIÓN DE ESTRUCTURA
MSF	: FUNCIÓN DE ESTRUCTURA MODIFICADA
STD	: DESVIACIÓN ESTÁNDAR
LASCA	: LASER SPECKLE CONTRAST ANALYSIS
LSI	: LASER SPECKLE IMAGING
DIC	: DIGITAL IMAGE CORRELATION

Capítulo 1. Introducción

1.1. Introducción General.

El estudio microscópico busca mediante distintas técnicas y métodos, hacer visibles objetos que no son perceptibles para el ojo humano. Esto permite identificar bacterias, defectos, actividades en superficies, alimentos y determinar efectos tanto beneficiosos como perjudiciales para el ser humano [1].

Dentro de estas técnicas de análisis microscópico existe una área de investigación que trabaja con el uso de luz láser, la cual consiste en la generación y análisis de un patrón de speckle buscando soluciones no destructivas ni invasivas para analizar diferentes objetos [2].

El patrón de speckle es un fenómeno óptico que se genera cuando haces de luz coherente inciden sobre una superficie y provocan reflexiones y/o difracciones. Este fenómeno resulta en un mapa de interferencia óptica que se caracteriza por presentar puntos de luz tanto blancos como oscuros en la superficie iluminada. Cuando la superficie iluminada experimenta movimientos moleculares, estos puntos varían en intensidad y la forma del patrón de speckle cambia en función del tiempo, lo que se conoce como patrón de speckle dinámico.

El patrón de speckle dinámico tiene aplicaciones en diversos campos de la óptica y medicina. Algunos ejemplos de su uso son la interferometría de speckle, diagnósticos médicos y análisis del movimiento en objetos.

1.2. Trabajos Previos.

Para generar este patrón de speckle se han utilizado distintos sistemas ópticos que incluyen una fuente emisora de luz coherente (láser), un sistema de alineación, un filtro óptico para limpiar y expandir el haz de la fuente de luz, un detector de imágenes (cámara) y un sistema de procesamiento de imágenes (computadora). Con el fin de analizar los diferentes sistemas ópticos utilizados para la obtención de un patrón de speckle, se estudiarán tres secciones dado el tipo de configuración utilizada para la generación del patrón de speckle, las secciones serán:

- a) Sistema clásico.
- b) Evolución del sistema clásico.
- c) Sistemas portables.

Para los sistemas clásicos se encuentran aquellos que se basan en un conjunto de lentes, espejos y filtros alineados para modificar y redireccionar el haz de luz láser. Estos sistemas están compuestos

principalmente por un filtro espacial, un lente colimador (lente cóncavo) y espejos para redireccionar esta luz. El objetivo del filtro espacial es obtener un haz de luz gaussiano limpio y sin ruido, mientras que el colimador tiene como finalidad generar un haz paralelo de luz para la alineación del sistema óptico.

Uno de los artículos investigados que trabaja con este sistema corresponde al **“Algorithm for dynamic Speckle pattern processing”** de J. Cariñe, R. Guzmán y F.A. Torres-Ruiz (2016) [3], en donde se presenta y estudia un nuevo algoritmo para procesamiento de imágenes con patrón de speckle. En este sistema, el haz de luz láser se transmite mediante un conjunto de lentes alineados y se utiliza una cámara CCD para capturar las imágenes. El haz de luz láser pasa a través de un filtro espacial y un lente colimador para ser redireccionado hacia la muestra que se analiza, y luego se captura el patrón de speckle mediante la cámara CCD.

En el artículo **“Laser speckle contrast analysis (LASCA): a technique for measuring capillary blood flow using the first order statistics of laser speckle patterns”** de G. Richards y J. Briers (1996) [19], se busca estudiar la velocidad del flujo sanguíneo capilar mediante LASCA, que es un algoritmo de procesamiento de imágenes. En este método, la muestra bajo estudio es iluminada con luz láser expandida y filtrada espacialmente. Dicha luz láser es generada por un láser He-NE de 40 mW, y el patrón de speckle es capturado mediante una cámara CCD y procesado posteriormente en un ordenador.

El tercer artículo estudiado que presenta un sistema clásico corresponde al utilizado en **“Quality assessment of laser speckle patterns for digital image correlation by a Multi-Factor Fusion Index”** (2020) de J. Song, J. Yang, F. Lui y K. Lu [29], en este artículo, se emplea el método de *'Digital Image Correlation (DIC)'* para medir deformaciones en metales a altas temperaturas. El sistema utilizado en este estudio consistía en un láser de 532 nm que se expandía a través de un filtro espacial para generar un patrón de speckle. Posteriormente, se empleaba una cámara CCD para la adquisición de la información.

También existen sistemas que no utilizan filtros espaciales, los cuales se clasificarán como evolución del sistema clásico. Un ejemplo de ello es el sistema descrito en el artículo **“Biospeckle laser technique – A novel non-destructive approach for food quality and safety detection”** de R. Pandiselvam, V.P. Mayookha, Anjineyulu Kothakota, S.V. Ramesh, Rohit Thirumdas (2019) [4], este artículo tiene como objetivo analizar de manera no destructiva la calidad y seguridad de los productos alimenticios, que pueden verse afectados durante su manipulación, transporte y procesamiento. El sistema óptico utilizado en este artículo consistía en un láser, un lente y un espejo

para generar el patrón de speckle, mientras que una cámara CCD se encargaba de capturar los datos para su posterior procesamiento en un ordenador. El haz de luz láser se expandía a través del lente y se redireccionaba hacia la muestra a analizar mediante el espejo, y el patrón de speckle se capturaba con una cámara CCD.

Un sistema similar que utiliza un lente colimador se presenta en el trabajo **"Fourier transforms for fast and quantitative Laser Speckle Imaging"** de J. Buijjs, J. van der Gucht & J. Sprakel (2019) [5], el cual propone un nuevo algoritmo de procesamiento de imágenes que utiliza la transformada de Fourier para obtener un espectro dinámico del material sobre un rango de frecuencia.

Además de los sistemas estáticos, también existen sistemas portables que aprovechan los avances anteriores en la tecnología Laser Speckle Imaging (LSI).

Un ejemplo de esto es el sistema prototipo presentado en el artículo **"A prototype system of portable laser speckle imager based on embedded graphics processing unit platform"** de Heping Chen, Peng Miao, Bin Bo, Yuanqi Li, y Shanbao Tong (2019) [6], el cual utiliza la técnica Laser Speckle Contrast Imaging (LSCI) para analizar el flujo sanguíneo. Este sistema utiliza un "embedded GPU system", una pantalla LCD táctil, una cámara CCD y un diodo láser modificado en el que se retira su lente de enfoque para expandir el haz de luz.

Otro sistema portable se presenta en el artículo **"A Portable Compact System for Laser Speckle Correlation Imaging of Artworks Using Projected Speckle Pattern"** (2020) de C. Daffara y E. Marini [30], En este artículo, se busca desarrollar un sistema portátil, compacto y versátil destinado a llevar a cabo un mapeo efectivo de defectos en pinturas mediante LSI. El sistema estaba compuesto por un láser cuyo haz de luz se modificaba a través de un lente y un difusor, con el fin de obtener un patrón de speckle en la muestra. La información generada por dicho patrón de speckle se capturaba mediante una cámara CMOS.

1.2.1. Discusión.

A partir de los sistemas para análisis de speckle en los artículos anteriores se puede observar una dependencia en el uso de lentes para modificar el haz de luz coherente, en algunos casos se utilizaban láseres directamente o incluso se modificaban y/o intervenían en el láser para lograr expandir el haz de luz láser, esto genera una limitación en cuanto al tipo de láser a utilizar como también el área de trabajo a analizar durante un proyecto, esto además de requerir mayor información acerca de la intervención en el sistema de un láser, y dependiendo del sistema utilizado limitar su portabilidad dado a la alineación necesaria en sus sistemas de lentes para el correcto funcionamiento.

Para solucionar estos problemas se propone utilizar como medio de transmisión de luz la fibra óptica, la cual dado a sus características ópticas es capaz de expandir el haz de luz láser y transmitirlo en el modo fundamental de luz, generando una salida gaussiana, la cual puede ser normalizada mediante algoritmos de procesamiento de imágenes, dado esto, la salida obtenida mediante fibra óptica es ideal para el correcto análisis de muestras microscópicas mediante algoritmos de procesamiento de imágenes.

Esto permitiría tener un sistema portable sin necesidad de una alineación entre el haz de luz láser y los lentes como se usan actualmente. Tener un sistema portable permite aumentar las posibilidades de estudio.

1.3. Hipótesis de Trabajo.

El uso de la fibra óptica como medio de transmisión de luz permitirá expandir el haz de luz láser y transmitirlo en el modo fundamental de luz, lo que generará una salida gaussiana ideal para el análisis de muestras microscópicas utilizando algoritmos de procesamiento de imágenes.

La utilización de la fibra óptica como medio de transmisión de luz en sistemas de análisis de speckle aumentará la portabilidad dado a que reducirá la necesidad de una alineación precisa entre el haz de luz láser y los lentes.

1.4. Objetivo General.

Desarrollar y evaluar un sistema óptico portable implementando el uso de fibra óptica para la transmisión de luz láser para análisis de movimiento microscópico mediante speckle dinámico.

1.5. Objetivos específicos.

- Diseñar y desarrollar sistema óptico portable.
- Realizar pruebas de detección de movimiento del sistema óptico portable mediante secado de pintura.
- Caracterizar sistema a partir de las pruebas.
- Evaluar resultados obtenidos y viabilidad del proyecto.

1.6. Alcances y Limitaciones.

- El proyecto se realizará con los recursos presentes en el Laboratorio de Optoelectrónica de la UCSC.
- Se aplicarán algoritmos de procesamiento de imágenes cualitativos para el análisis de imágenes con speckle dinámico.
- No se propondrán algoritmos de procesamiento de imágenes.

1.7. Metodología.

Para lograr analizar la movilidad microscópica, se requerirá como primer paso el diseño y desarrollo de un sistema óptico portátil, capaz de ser transportado dentro del laboratorio de optoelectrónica. Este dispositivo debe ser liviano y, dado a que se realizarán pruebas iterativas, lograr reproducir resultados idénticos o bastante similares en diferentes sectores donde se evalúa el sistema.

La primera prueba consistirá en evaluar la iluminación del sistema óptico desarrollado para verificar la teoría estudiada y las hipótesis de esta tesis. Posteriormente, se llevarán a cabo pruebas de secado de pintura en distintos sectores del laboratorio con el propósito de caracterizar el sistema. La pintura que se utilizará será el corrector líquido para lapicera de la marca Wilson en formato de frasco y pincel, ya que permite un secado más rápido en comparación con las pinturas convencionales.

El análisis de estas pruebas se llevará a cabo mediante algoritmos de procesamiento de imágenes con speckle dinámico en Matlab. Durante este proceso, se aplicará una métrica de precisión en la detección de movilidad, se realizará un estudio gravimétrico de la muestra y se establecerá una correlación entre los datos obtenidos por el sistema con el fin de evaluar la portabilidad del sistema óptico portable.

Capítulo 2. Marco Teórico

2.1. Introducción

En este capítulo se abordan los elementos fundamentales para la comprensión de las tecnologías ópticas presentes en esta tesis. Donde se explorarán los fundamentos de la luz láser y su interacción con la materia, así como la propagación de esta luz mediante la fibra óptica. Además, se presentará uno de los métodos de detección de luz realizado por las cámaras y como se relaciona la luz láser con la resolución de una cámara. Por último, se presentará el concepto de interferencia óptica que ocurre mediante el uso de luz láser.

2.2. Luz láser.

La emisión de luz láser ocurre por el principio de emisión estimulada, la cual surge cuando un fotón induce a un electrón que se encuentra en un estado excitado, generando un fotón con la misma longitud de onda al fotón inducido, al realizar este proceso iterativamente se genera un haz de luz coherente, monocromática y direccional (ver figura 1). Al hablar de coherencia nos referimos a que mantiene una relación entre longitud de onda y fase en el tiempo, donde esta relación se mantiene constante en el tiempo, al ser monocromática mantiene un mismo color, y finalmente direccional es que no presenta dispersión en su emisión de luz y el haz de luz se presenta en un área determinada [7] [8].

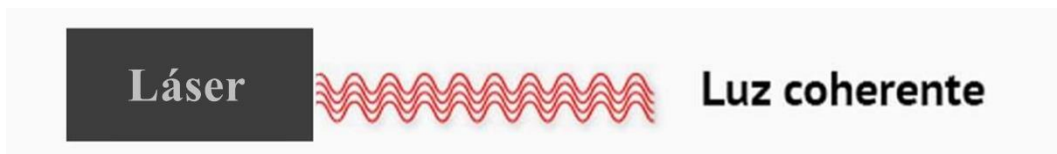


Fig 1. Haz de luz Láser.

La emisión de luz láser es posible de obtener a partir de distintas configuraciones, como lo son los láseres de gas o láseres de estado sólido, sin embargo, estos láseres presentan un mayor costo de construcción además de un mayor tamaño en general.

Sin embargo, existe un sistema de bajo costo y más accesible para la comunidad, este corresponde al diodo láser, que se encuentra fabricado de un semiconductor, los diodos láser son utilizados en distintas áreas tecnológicas y científicas, ya sea para la industria para realizar cortes o soldaduras, o en la vida cotidiana para leer un código de barra o un disco.

Para los punteros láser se utiliza comúnmente la aleación de GaAs con longitudes de onda de 635, 650 y 670 nm, trabajando bajo el mismo principio de emisión estimulada [8].

Al iluminar una superficie con un haz de luz coherente se presentan diferentes procesos relacionados a la interacción del haz de luz con el medio iluminado, estos procesos dependen de la longitud de onda del haz de luz y como se compone la superficie a estudiar, donde la luz que interactúa con el medio puede ser reflejada, absorbida, dispersada y/o transmitida (ver figura 2) [9].

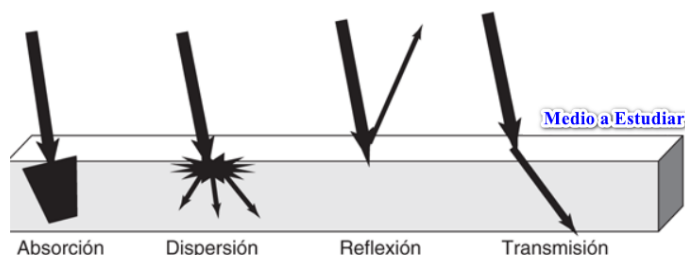


Fig 2. Procesos de la luz ante un medio [27].

2.3. Fibra óptica como medio de transmisión de luz.

La fibra óptica convencional corresponde a una estructura de silicio con un grosor similar al de un cabello humano la cual es utilizada principalmente en telecomunicaciones, esta se compone de un núcleo, revestimiento y su última capa corresponde al recubrimiento (ver figura 3). La transmisión de información de la fibra óptica ocurre a partir de pulsos o haces de luz en su núcleo, dado a las diferencias de índice de refracción entre el núcleo y el revestimiento, donde el núcleo presenta un índice de refracción mayor al revestimiento, lo que genera una reflexión total interna, siempre y cuando la luz incidente no supere el ángulo crítico de incidencia en el núcleo de la fibra óptica, como último componente está el recubrimiento que tiene la función de aislador y protección de la fibra óptica [10]. En la figura 3 se observan las partes fundamentales dentro de la fibra óptica.

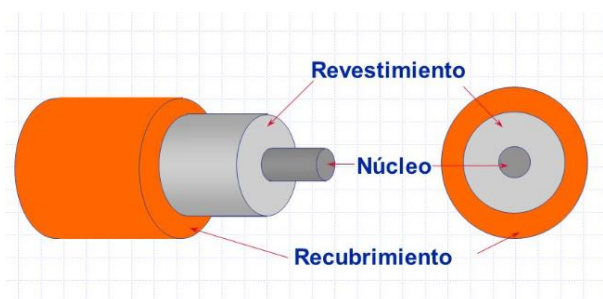


Fig 3. Diseño de Fibra óptica convencional.

La luz incidente dentro de la fibra óptica, se puede descomponer en ondas electromagnéticas independientes que viajan a una misma velocidad dentro de la fibra, pero estos pueden tomar distintos caminos ópticos para salir de la fibra óptica, este fenómeno puede ocurrir dado a la diferencia entre la longitud de onda del haz de luz y el diámetro del núcleo de la fibra utilizada, ocasionando que estas ondas electromagnéticas que viajan a la misma velocidad tengan un recorrido distinto a la salida de la fibra óptica, estos se denominan modos de propagación o modo transversal electromagnético (TEM). Algunos de estos modos se pueden ver en la figura 4, donde TEM_{00} corresponde a un modo de propagación fundamental, es monomodo y presenta una distribución gaussiana, mientras TEM_{01} Y TEM_{10} corresponden a modos de propagación multimodo [11].

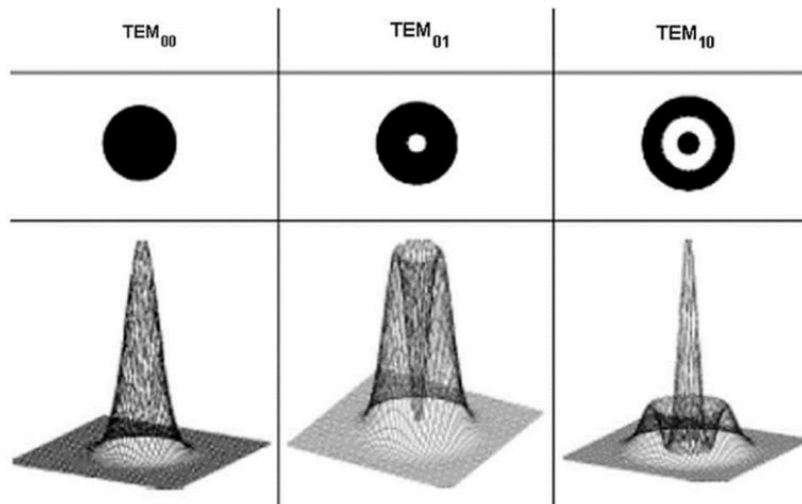


Fig 4. Modos transversales electromagnéticos para láseres [11].

Dados estos modos de propagación se presentan dos tipos de fibra óptica: las monomodo y multimodo, donde las fibras monomodo se caracterizan por tener un núcleo de diámetro muy pequeño (8,3 micras aproximadamente), mientras que en las fibras multimodo su núcleo es de mayor diámetro (50 a 62,5 micras) lo que puede generar que la luz incidente tenga 2 o más caminos ópticos distintos debido a la longitud de onda que está presente [12].

Idealmente para este estudio se busca utilizar un modo de propagación monomodo, también denominado TEM_{00} o modo fundamental, este se caracteriza por presentar un perfil gaussiano a la salida de la fibra óptica [12]. Este perfil de iluminación es importante para el procesamiento de imágenes que se requerirá más adelante.

2.4. Detección de luz.

El proceso de detección de luz en cámaras ocurre a partir del uso de fotodiodos, el funcionamiento de estos se basa en conducir una cantidad de corriente eléctrica proporcional a la luz que incide en él. Durante este trabajo se utiliza una cámara que integra un sensor CMOS.

Sensor CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor): Se compone de una matriz de fotodiodos y amplificadores MOSFET (ver figura 5), dado a la alta cantidad de electrónica presente en el fotodiodo estos presentan una menor área fotosensible. Cada fotodiodo captura la luz, transformándola en carga eléctrica para luego ser transformada en una tensión eléctrica, esta tensión eléctrica es convertida en datos digitales a partir de un conversor análogo digital [13].

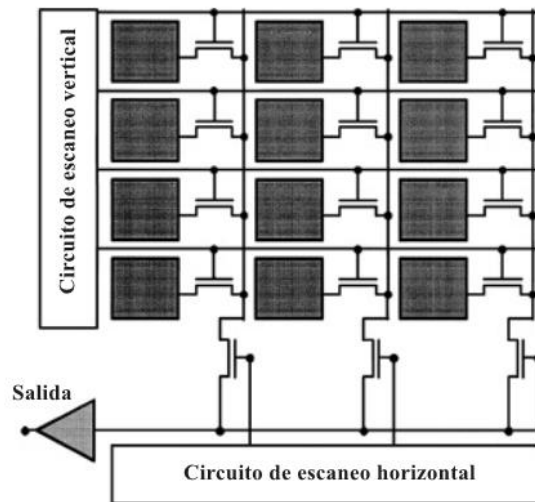


Fig 5. Funcionamiento de sensor CMOS antes de conversión análogo digital [14].

Sin embargo, antes de la detección de luz generada por los sensores de la cámara a utilizar se encuentra el plano de observación, el cual corresponde al lugar espacial donde se forma la imagen a partir del lente de la cámara. El lente tiene como finalidad enfocar el plano imagen de lo que se quiere observar, para explicar el funcionamiento de la cámara y el lente hay que imaginarse una cámara como una caja cerrada con un agujero, este agujero permite la entrada de los haces de luz reflejados de la muestra u objeto a observar y serán presentados en la pared opuesta al agujero, el resultado de esto dará una figura invertida de tamaño reducido en la pared opuesta al agujero de la caja.

Este agujero presente en la caja representaría al punto focal para dar imagen, mientras que el fondo donde se refleja de manera invertida la imagen correspondería al plano imagen que detectaría el sensor de la cámara utilizada. La figura 6 muestra un esquema de funcionamiento de un lente de cámara [15].

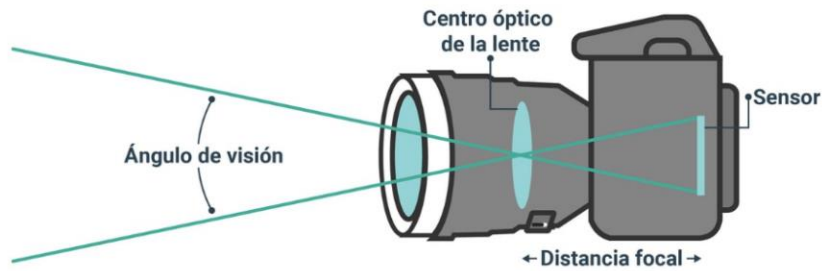


Fig 6. Esquema funcionamiento de la cámara [16].

Para obtener una imagen nítida o ajustar el plano imagen, el lente tiene la función de regular la distancia focal, dada por la ecuación del lente representado en la ecuación (1), que relaciona la distancia focal de una lente (f) con la distancia de enfoque (D) y la distancia que se forma la imagen (d) (ver figura 7).

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{d} + \frac{1}{D} \quad (1)$$

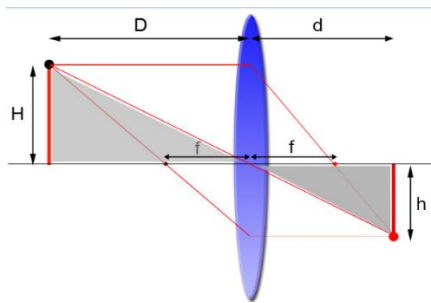


Fig 7. Representación de lente de cámara [25].

Además de los lentes, se utiliza un diafragma (iris), permitiendo regular la luz que ingresa a la cámara, la apertura de diafragma permite un mayor ingreso de luz, mientras que al cerrarlo ingresa una menor cantidad de luz.

A partir del uso del lente en el sensor de la cámara se genera el plano imagen de lo observado, invertido y de menor tamaño. En este plano imagen puede ocurrir la interferencia óptica de haces de luz coherentes, dado a las interacciones de luz y el medio iluminado, como puede ser la reflexión y/o difracción.

La resolución de las observaciones se refiere a la distancia mínima que separa dos puntos y que puede ser identificada como elementos dentro de la muestra observada. Dicha resolución de observación se encuentra determinada por la ecuación (2), la cual establece una relación entre la longitud de onda del haz de luz (λ) y la apertura numérica del objetivo o lente empleado (AP). Por

otro lado, la apertura numérica se define mediante la ecuación (3) la cual relaciona la distancia focal del lente y la apertura de este mediante un valor numérico [26].

$$\text{Resolución } (r) = \frac{\lambda}{2 \cdot AP} \quad (2)$$

$$AP = \frac{\text{Distancia Focal}}{F_n} \quad (3)$$

Donde: F_n corresponde al rango de apertura del lente.

2.5. Interferencia óptica.

La interferencia óptica es un fenómeno que ocurre cuando dos o más haces de luz coherentes se superponen en un mismo punto, dependiendo de la fase presente entre estos haces de luz se produce una interferencia constructiva, o destructiva. La interferencia constructiva ocurre cuando los haces de luz interceptados presentan la misma fase, produciendo una intensidad igual o mayor a la original en el espacio interceptado, mientras que la interferencia destructiva ocurre cuando hay un desfase mayor a $\pi/2$ entre los haces de luz interceptados, esto provoca una pérdida en la intensidad del haz de luz y se ve representado por un espacio sin iluminación [17]. En la figura 8 se representa como interactúa la luz con una muestra no uniforme y que información llega al plano de observación.

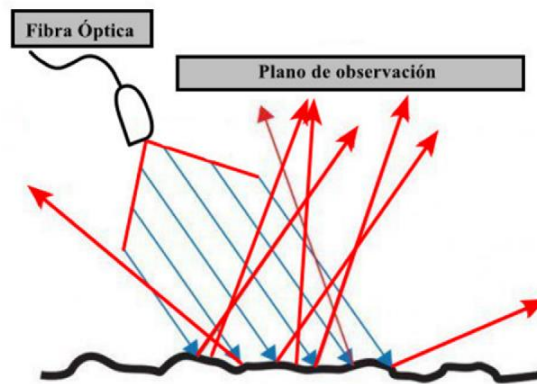


Fig 8. Esquema plano de observación e interferencia de haces de luz.

Para ejemplificar este fenómeno se utiliza el interferómetro de Mach Zehnder, este consiste en un sistema de interferencia formado por divisores de haces, donde la primera intervención de estos tiene la función de dividir el haz de luz incidente en 2, donde uno es reflejado y el otro es transmitido, teniendo caminos ópticos distintos, mientras que en la segunda intervención se genera una recombinación de estos haces. Cabe destacar que la suma de la parte transmitida y la parte reflejada

deben ser igual a la señal original. Una de las salidas de este interferómetro es capaz de ejemplificar la interferencia óptica, la cual se encuentra dada por la ecuación (4):

$$I_{out(1)} = \cos^2\left(\frac{\phi}{2}\right) \quad (4)$$

Donde ϕ corresponde a la diferencia de fase entre los haces a la salida del interferómetro, a partir de esto, se tiene que para la salida $I_{out(1)}$, cuando los haces presenten una diferencia de fase igual a 0° , es decir, presenten la misma fase, se va a estar produciendo una interferencia constructiva generando un espacio iluminado, mientras que si la diferencia de fase entre estas es π se obtiene una interferencia destructiva la cual generará un espacio sin iluminación. El comportamiento de esta función se puede apreciar en la figura 9 [27].

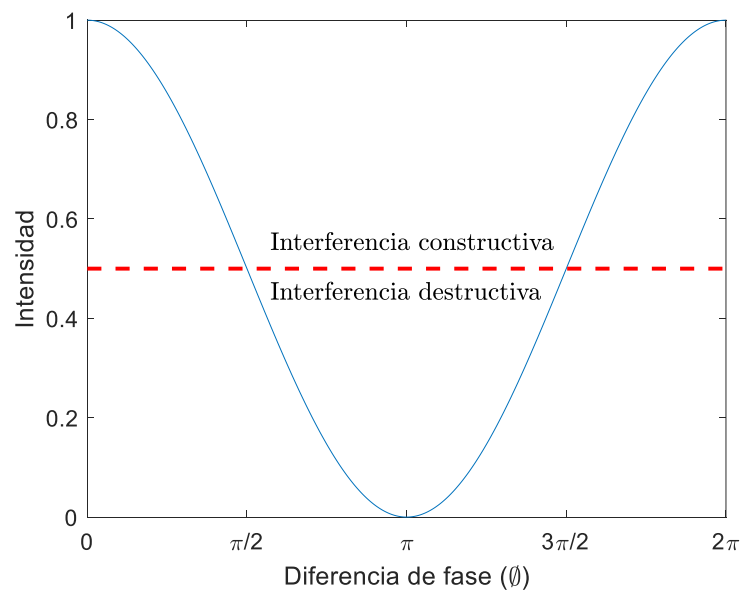


Fig 9. Comportamiento de función $y = \cos^2\left(\frac{\phi}{2}\right)$ para $0 < \phi < 2\pi$.

Desde la figura 9, se puede observar que el máximo de intensidad se genera cuando los haces de luz interceptados están en fase, mientras que el mínimo de intensidad se obtiene cuando estos haces no están en la misma fase, este mínimo se alcanza cuando el desfase toma el valor de π .

Capítulo 3. Speckle Dinámico: Procesamiento y Sistemas

3.1 Patrón de Speckle Dinámico.

El patrón de speckle corresponde a una imagen granular generada por la interferencia de haces de luz coherente (como la de un diodo láser), esta imagen granular presenta puntos iluminados y oscuros (ver figura 10) dada las condiciones que se encuentran en el medio, si estos puntos no varían en el tiempo se estaría presente ante un Speckle Estático, donde la muestra no presenta movilidad.



Fig 10. Ejemplo Patrón speckle simulado mediante MATLAB.

En cambio, cuando estos puntos presentan una variación, se le denomina Speckle Dinámico. Esto representa que la muestra estudiada tiene movilidad, lo que provoca que el patrón de speckle varíe en el tiempo. A partir de estos fenómenos, es posible estudiar la movilidad microscópica de una muestra de manera no invasiva, gracias a algoritmos de procesamiento de imágenes con Speckle Dinámico.

3.2 Algoritmos de procesamiento de imágenes.

Los algoritmos de procesamiento de imágenes con patrón de speckle dinámico permiten cuantificar el movimiento microscópico presente en una muestra, mediante el estudio de capturas al medio iluminado durante el tiempo que se estime conveniente.

Estos algoritmos de procesamiento de imágenes pueden ser cuantitativos y cualitativos, los algoritmos cuantitativos generan una magnitud única representando el movimiento total de la muestra iluminada, mientras que los algoritmos cualitativos permiten analizar el movimiento en zonas específicas de la muestra, diferenciando la movilidad de la muestra en distintas zonas.

A partir de esto, se propone estudiar solo algoritmos cualitativos presentados en el artículo **“Characterization of topography hidden under paint by means of qualitative algorithms robust to the number of frames and non-uniform illumination”** desarrollado por E. Baradit, M. Avedaño., G. Cañas, M. Yañez, M. Trivi y J. Cariñe. (2022) para un análisis de micro actividad [18].

Los algoritmos cualitativos son aplicados directamente a la intensidad de cada píxel de una imagen (I_k), donde k representa el tiempo discreto, que viene dado de la relación $k = \delta \cdot t$, siendo δ el tiempo de muestreo de la cámara (fps). Estos tipos de descriptores utilizan la información de dos imágenes en diferentes instantes de tiempo, obteniendo la información de movilidad la cual es acumulada y genera una magnitud que representa la movilidad microscópica en una muestra [18].

Los algoritmos cualitativos se pueden dividir en dos secciones, los no normalizados que se ven afectados por el perfil de iluminación de luz y por la cantidad de capturas, y los normalizados que buscan solucionar estos problemas.

Tabla 1: Algoritmos de procesamiento de imágenes cualitativos	
Algoritmos no normalizados	Algoritmos normalizados
Generalized differences (GD)	Laser speckle analysis (LASCA)
Weight generalized differences (WGD)	Laser speckle imaging (LSI)
Structure Function (SF)	FUJII
Modified Structure Function (MSF)	Normalized DJC
Standard Derivation (STD)	
DJC	

Para estudiar estos algoritmos se utilizó una simulación de patrón de speckle sobre 100 imágenes, la simulación consistía en formar una imagen de dos cilindros y una base de speckle dinámico a partir un perfil de iluminación gaussiano, donde la base presenta una baja actividad de movilidad, el cilindro grande una movilidad mediana y el cilindro pequeño una alta movilidad, a partir de la figura 11 se puede apreciar una aproximación del resultado de la simulación.

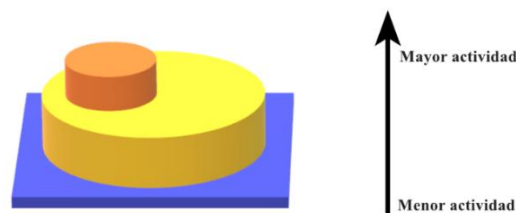


Fig 11. Efecto esperado a partir de la simulación.

3.2.1 Algoritmos no normalizados.

Algoritmos GD y WGD.

El algoritmo de Diferencias Generalizadas (GD) utiliza la base de los algoritmos cualitativos obteniendo un mapa de movilidad generado a partir de la diferencia de intensidad a cada píxel (I_k) de la imagen durante N imágenes separados por m capturas. La acumulación de estas diferencias genera una matriz de magnitudes representativas de la movilidad de la muestra y se evalúa a partir de la ecuación (5). A diferencia de GD el algoritmo Diferencias Generalizadas Pesadas (WGD) utiliza una variable adicional w_m , que representa el peso de la imagen dado a la distancia m de las capturas evaluado a partir de la ecuación (6). Los perfiles obtenidos de estos algoritmos se ven en la figura 12.

$$GD = \sum_{k=1}^{N-M} \sum_{m=1}^M |I_k - I_{k+m}| \quad (5)$$

$$WGD = \sum_{k=1}^{N-M} \sum_{m=1}^M |I_k - I_{k+m}| \cdot w_m \quad (6)$$

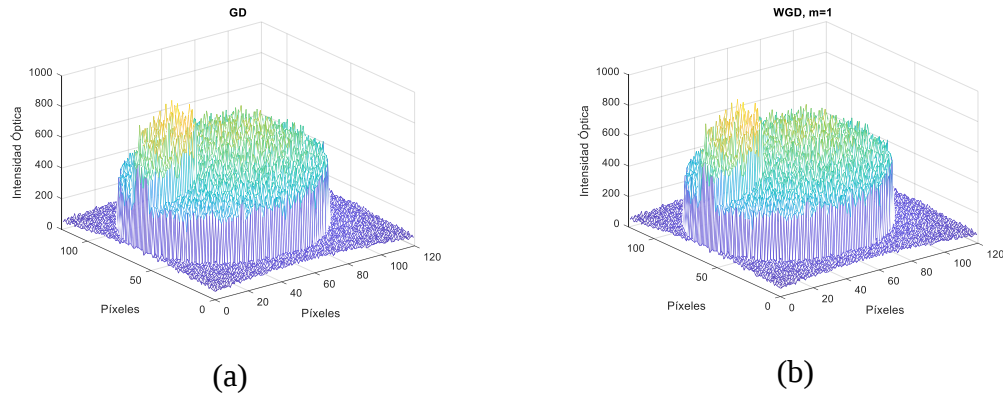


Fig 12. (a) Algoritmo GD, (b) Algoritmo WGD para m=1 obtenidos a partir de simulación en MATLAB.

Algoritmo SF y MSF.

En el algoritmo SF, se genera una diferencia entre los píxeles entre distintas imágenes, esta es elevada al cuadrado y luego dividido por la diferencia entre la cantidad de capturas y la separación de estas, este algoritmo es aplicado a partir de la ecuación (7). Mientras que el algoritmo MSF la diferencia generada entre los píxeles de cada toma es acumulada en valor absoluto representado por la ecuación (8). Ambos métodos generan una suma constructiva de la diferencia de entre los píxeles de cada imagen. Los perfiles de estos algoritmos se ven en la figura 13.

$$SF = \frac{1}{N-m} \sum_{k=1}^{N-m} (I_k - I_{k+m})^2 \quad (7)$$

$$MSF = \frac{1}{N-m} \sum_{k=1}^{N-m} |I_k - I_{k+m}| \quad (8)$$

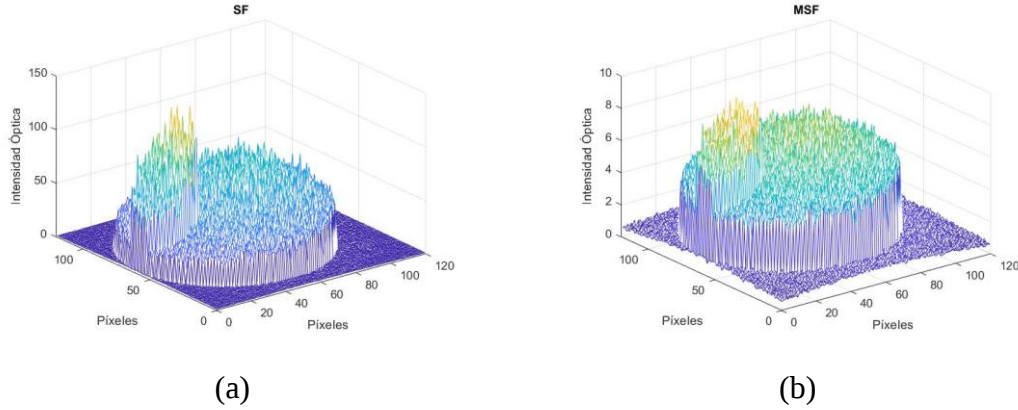


Fig 13. (a) Algoritmo SF, (b) Algoritmo MSF para m=1 obtenidos a partir de simulación en MATLAB.

Algoritmo STD.

El algoritmo STD es un algoritmo no normalizado, el cual corresponde a una desviación estándar en el tiempo, para esto es necesario obtener el promedio de las intensidades por píxel en el tiempo, que tiene está representado por $\langle I_k \rangle$, el algoritmo es aplicado por la ecuación (9).

$$STD = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^{N-1} (I_k - \langle I_k \rangle)^2} \quad (9)$$

Donde $\langle I_k \rangle = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N I_k$ corresponde a la media temporal de las intensidades de cada píxel I_k , la figura 14 muestra el perfil obtenido mediante este algoritmo.

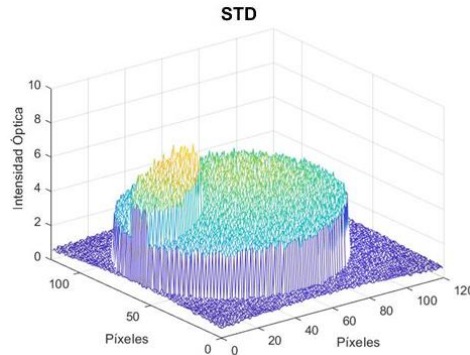


Fig 14. Aplicación de algoritmo STD a simulación en MATLAB.

Algoritmo DJC.

Como último algoritmo no normalizado se presenta el algoritmo DJC, el cual obtiene una alta correlación hacia los algoritmos cuantitativos además de estar intrínsecamente normalizado respecto a N (cantidad de capturas), y es aplicado mediante la ecuación (10) presentada a continuación [3], la figura 15 muestra el perfil obtenido mediante este algoritmo.

$$DJC = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N \frac{(I_k - I_{k+1})^2}{I_k + I_{k+1}} \quad (10)$$

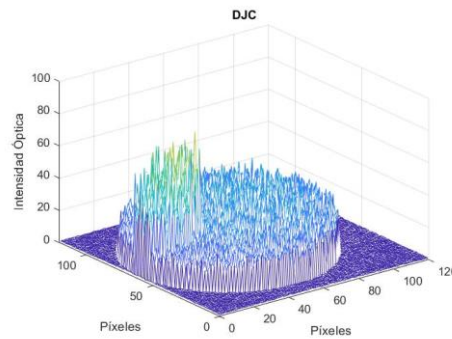


Fig 15. Aplicación de algoritmo DJC a simulación en MATLAB.

Análisis de algoritmos no normalizados.

A partir del uso de estos algoritmos no normalizados se puede apreciar que sus mapas de movilidad presentan una diferencia en cuanto a la forma presentada en la figura 11, esto ocurre por el perfil de iluminación utilizado, ya que, al no ser uniforme, afecta de manera negativa a la aplicación de estos algoritmos, incorporando un índice gaussiano a las imágenes analizadas.

3.2.2 Algoritmos Normalizados.

Por otro lado, se presentan los algoritmos de procesamiento de imágenes normalizados, estos tienen la capacidad de normalizar los resultados frente a perfiles de iluminación no uniformes o respecto a la cantidad total de capturas utilizadas. Si bien idealmente se buscaría un perfil de iluminación plano, esto es más complicado para realizar, por lo que se opta por utilizar un perfil de iluminación gaussiano, el cual es más fácil de generar y mediante algoritmos de procesamiento de imágenes normalizados es posible de filtrar y obtener resultados con una mayor correlación frente a los no normalizados [18].

Algoritmo LASCA.

El algoritmo LASCA corresponde a la normalización del algoritmo STD respecto a la media temporal de cada píxel $\langle I_k \rangle$, permitiendo normalizar el sistema a través del perfil de iluminación y su evaluación está dada por la ecuación (11) [19]. La figura 16 muestra el perfil de este algoritmo.

$$LASCA = \frac{1}{\langle I_k \rangle} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^{N-1} (I_k - \langle I_k \rangle)^2} \quad (11)$$

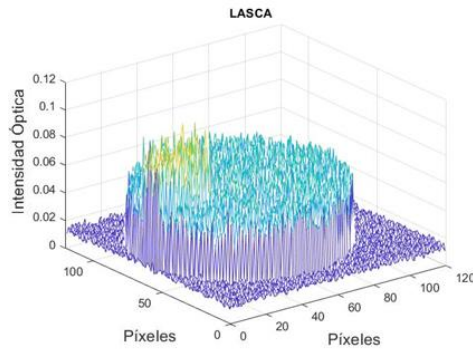


Fig 16. Aplicación de algoritmo LASCA a simulación en MATLAB.

Algoritmo LSI.

El algoritmo LSI permite obtener una mayor información espacial bajo las mismas condiciones que LASCA y se encuentra normalizado respecto al perfil de iluminación representado por la ecuación (12) [20]. La figura 17 muestra el perfil obtenido mediante este algoritmo.

$$LSI = \sum_{k=1}^{N-1} \frac{(\langle I_k^2 \rangle - \langle I_k \rangle^2)}{\langle I_k \rangle^2} \quad (12)$$

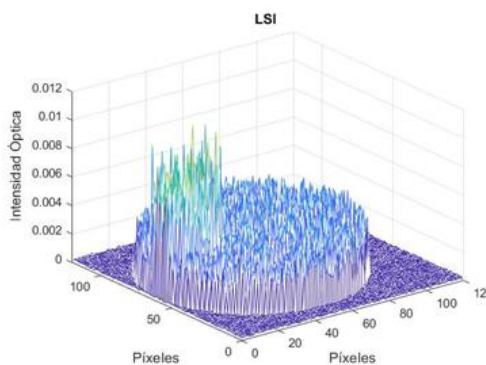


Fig 17. Aplicación de algoritmo LSI a simulación en MATLAB.

Algoritmo FUJII.

El algoritmo FUJII o diferencias normalizadas corresponde a un algoritmo con normalización de intensidad intrínseca, que también es normalizado respecto a la cantidad de capturas N y presenta la ecuación (13) para su evaluación, el perfil obtenido mediante este algoritmo se ve en la figura 18.

$$FUJII = \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^{N-1} \left| \frac{I_k - I_{k+1}}{I_k + I_{k+1}} \right| \quad (13)$$

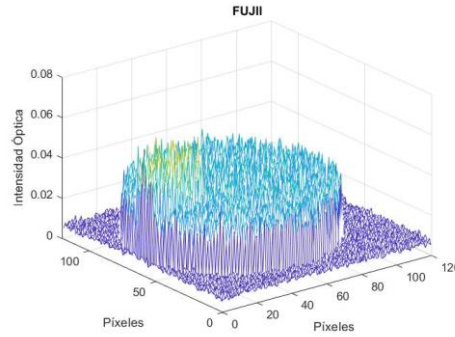


Fig 18. Aplicación de algoritmo FUJII a simulación en MATLAB.

Algoritmo NDJC.

El último algoritmo normalizado a analizar corresponde a Normalized DJC, donde a partir de del artículo *Characterization of topography hidden under paint by means of qualitative algorithms robust to the number of frames and non-uniform illumination* [18] se evaluó obteniendo resultados de un algoritmo normalizado intrínsecamente en el número de capturas (N) y estable ante un perfil de iluminación no uniforme. Este es aplicado mediante la ecuación (14).

$$NDJC = \frac{1}{\langle I_k \rangle^2} \sum_{k=1}^{N-1} \frac{(I_k - I_{k+1})^2}{I_k + I_{k+1}} \quad (14)$$

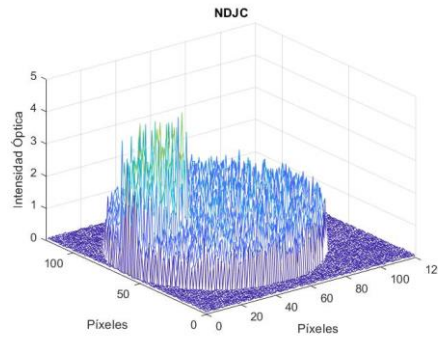


Fig 19. Aplicación de algoritmo NDJC a simulación en MATLAB.

Análisis de algoritmos normalizados y resultados simulados.

A partir de las simulaciones utilizando algoritmos normalizados se logra apreciar que estos entregan un mapa de movilidad sin la presencia de una iluminación gaussiana, logrando una forma similar a la esperada en la figura 11.

De esto se identifica que los algoritmos normalizados entregan resultados mejores a los algoritmos no normalizados, logrando un mapa de movilidad bastante similar al esperado en la simulación.

3.3 Sistemas ópticos previos para análisis de speckle.

Para lograr generar un patrón de speckle es necesario una configuración óptica que permita modificar el haz de luz láser de tal manera que tenga un área de iluminación mayor y una iluminación de tipo Gaussiana, esta es realizada a partir de filtros, lentes y espejos. Por lo que se observarán las configuraciones utilizadas en distintos trabajos vinculados al efecto speckle con la finalidad de observar los puntos importantes y diferencias entre estos.

Algorithm for dynamic Speckle pattern processing (J. Cariñe et al.) [3], la finalidad de este artículo es presentar un nuevo algoritmo de procesamiento de imágenes, este algoritmo provee información cualitativa sobre la actividad en una superficie mediante speckle dinámico.

Para lograr este análisis de speckle dinámico se requiere un sistema óptico el cual estaba conformado por un Láser He-Ne (628.3 nm), un filtro espacial, un colimador de haz y espejos para redireccionar el haz de luz. El filtro espacial se componía por un lente de microscopio con un aumento de x60 y un pinhole de 25 μm de diámetro produciendo un haz gaussiano filtrado espacialmente, luego se producía una colimación de haz con un lente de 7,62 cm de diámetro con 10 cm de distancia focal, produciendo un haz de aproximadamente 7 cm. Este filtro espacial y el colimador se encontraban alineados horizontalmente y a partir de espejos el haz de luz era reorientado al lugar de muestra, el sistema se ve representando en la figura 20.

Biospeckle laser technique – A novel non-destructive approach for food quality and safety detection (R. Pandiselvam, et al.) [4], en este trabajo se busca analizar de manera no destructiva la calidad de productos y seguridad para su ingesta, esta calidad de los productos puede ser alterada dado a daños, contaminación, maduración, etc. Pero puede ser analizada de manera no destructiva a través del análisis de biospeckle y otras técnicas de procesamiento de imágenes.

Para este trabajo el sistema óptico utilizado para la generación del patrón de speckle consistía en un láser, un lente y un espejo, donde el haz de luz láser pasaba por el lente para ser expandido y

luego era redireccionado por el espejo, para la obtención de datos se utiliza una cámara CCD conectada a un computador, representado en la figura 21.

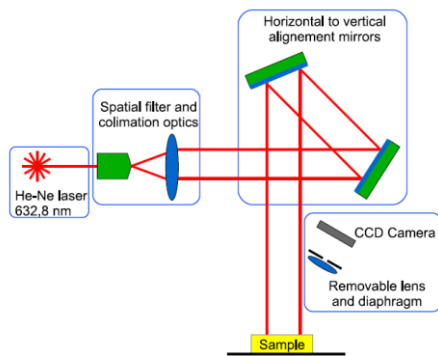


Fig 20. Sistema óptico utilizado en [3].

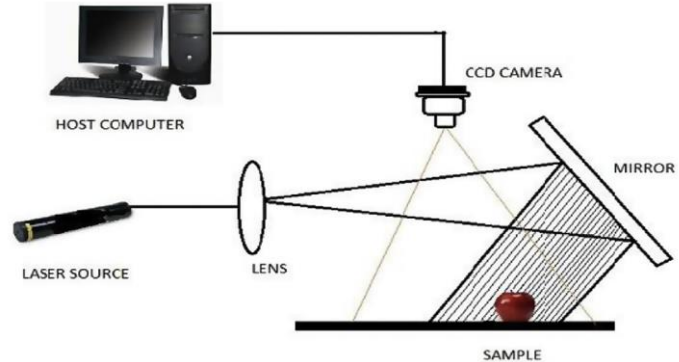


Fig 21. Sistema óptico utilizado en [4].

Fourier transforms for fast and quantitative Laser Speckle Imaging (J. Buijjs et al.) [5], el artículo consiste en la aplicación de la transformada de Fourier en un nuevo algoritmo para el procesamiento de imágenes de manera más rápida, entregando un espectro dinámico del material sobre un rango de frecuencia. Además de presentar un modelo portable para su uso, es decir, permite ser transportado a distintos sitios para realizar estudios donde se requiera. El modelo consiste en el uso de un diodo láser de 50 mW alimentado por una batería, el haz de luz láser es expandido por un lente en frente del láser, mientras que la información patrón de speckle es recogida por una cámara CMOS equipada con un lente de iris y zoom variable y la iluminación ambiente es removida con un Notch Filter (Filtro Rechaza banda) y esto es montado sobre una superficie reductora de vibraciones, representado por la figura 22.

Quantifying solvent action in oil paint using portable laser speckle Imaging (Lambert Baij, Jesse Buijs, Joen J. Hermans, Laura Raven, Piet D. Iedema, Katrien Keune & Joris Sprakel) [21], la finalidad de este artículo es estudiar la exposición de pinturas al óleo ante solventes orgánicos para remover barniz y/o al agua para remover la suciedad de la superficie de estas. Con este estudio se busca reducir la exposición de estos solventes durante la limpieza de estas pinturas, de manera analítica cuantificando el movimiento microscópico utilizando Fourier Transform Laser Speckle Imaging (FT-LSI) y un equipo portable para este análisis. Este sistema consiste en un láser de 532nm (20mW, cobalt samba), que es expandido por un lente bicóncavo, la iluminación retro dispersada es capturada por un zoom variable y el patrón de speckle por una cámara (Thorlabs, DCC3240N), su diagrama se aprecia en la figura 23.

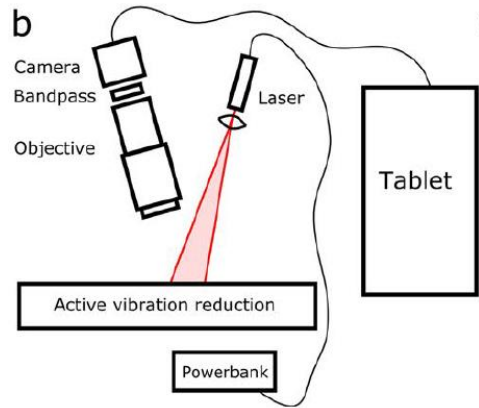


Fig 22. Sistema óptico utilizado en [5].

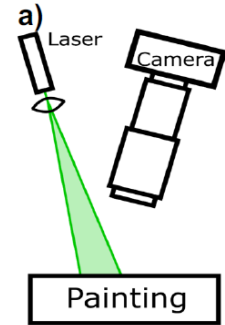


Fig 23. Sistema óptico utilizado en [21].

A prototype system of portable laser speckle imager based on embedded graphics processing unit platform (Heping Chen, Peng Miao, Bin Bo, Student Member, IEEE, Yuanqi Li, Shanbao Tong*, Senior Member, IEEE) [6], para este artículo se propone un sistema portable para la aplicación de Laser speckle contrast Imaging (LSCI) en el flujo sanguíneo, implementando una opción portable para su uso. A diferencia de otros tipos, este sistema consistía en la utilización de un “embedded GPU system” y una pantalla LCD táctil, una cámara CCD y un diodo láser modificado, donde se retiraba su lente enfocado para lograr expandir el haz de luz, el sistema se encuentra representado en la figura 24.

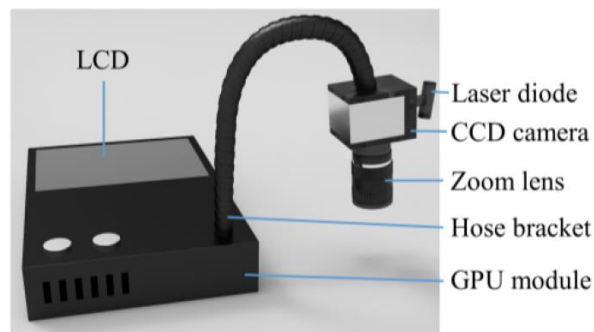


Fig 24. Sistema óptico utilizado en [6].

3.4 Dispositivos comerciales.

Actualmente se ha identificado un dispositivo comercial que se utiliza dentro del área de la medicina, corresponde al **RFLSI III Laser Speckle Perfusion Imager RWD**, el cual corresponde a un dispositivo portable para investigación preclínica en el sistema de vasos sanguíneos en tiempo real, donde sus áreas de aplicación son las siguientes [22]:

- CBF (Cerebral Blood Flow).
- Model MCAO (Embolic middle cerebral artery occlusion).
- Flujo sanguíneo gastrointestinal.
- Isquemia de miembros inferiores / angiogénesis.
- Evaluación de quemaduras.
- Prueba de parche cutáneo.
- Inhibición de la difusión de la corteza cerebral (cerebral cortex diffusion inhibition).

Este dispositivo se basa en el algoritmo LSCI como algoritmo de procesamiento de imágenes, y sus parámetros técnicos se aprecian en la tabla 2 y su modelo se aprecia en la figura 25.

Tabla 2: Características del sistema.

Indicador	Parámetros
Escala	0 – 5000 PU
Ratio de adquisición de imágenes	Hasta 120 FPS
Distancia de trabajo	10 – 35 cm
Tamaño de imagen	1.57 × 1.57mm – 90 × 90mm
Píxeles en la cámara	4.2 millones (2048 × 2048)
Resolución máxima	Hasta 3µm/pixel
Rango de acercamiento	12× (acercamiento óptico con lente de foco automático)
Longitud de onda	785nm

Fuente: <https://www.wpi-europe.com/products/microscopes--cameras/laser-speckle-contrast-imaging/rflsi-iii-laser-speckle-contrast-imaging-system.aspx>.



Fig 25. RFLSI III de RWB [22].

Este dispositivo es comercializado mediante BioLink para América del Sur, donde BioLink es representante de RWD Life Science Inc. propietario de este producto.

3.5 Discusión y propuesta de diseño.

La portabilidad de un sistema se refiere a la capacidad de dicho sistema para ser trasladado e instalado en distintos lugares sin presentar inconvenientes para realizar sus funciones, esto es importante dado a que permite al usuario trabajar con el mismo sistema, de manera rápida, eficiente y realizar comparaciones de una muestra en distintos ambientes.

A partir de los sistemas para análisis de speckle en los artículos anteriores se puede observar una dependencia en el uso de lentes y espejos para modificar y conducir el haz de luz coherente y en algunos casos era necesario filtrar el haz de luz para obtener una luz coherente más limpia, esto genera que la portabilidad de dispositivos ópticos se dificulte, dado a los alineamientos necesarios para el correcto funcionamiento de estos sistemas.

Dado esto, se propone crear un sistema óptico portable el cual utilice fibra óptica como medio de transmisión de luz, la cual, dado a sus características ópticas de transmitir el haz de luz láser en un modo fundamental de luz, generando una salida gaussiana, sin embargo, como se menciona en el marco teórico, es necesario utilizar una fibra óptica acorde a la longitud de onda de la fuente de luz a utilizar. Esto será desarrollado en el siguiente capítulo, incorporando todos los elementos a utilizar para permitir su portabilidad y caracterización del sistema.

Capítulo 4. Desarrollo de dispositivo óptico portable

4.1 Esquema y componentes del dispositivo.

Dado al análisis anterior el dispositivo óptico portable debe constar con los elementos básicos para la generación y adquisición de un patrón de speckle dinámico, esto se debe presentar en un modelo liviano, compacto y de fácil instalación. El diseño propuesto para este sistema óptico se observa en la figura 26:

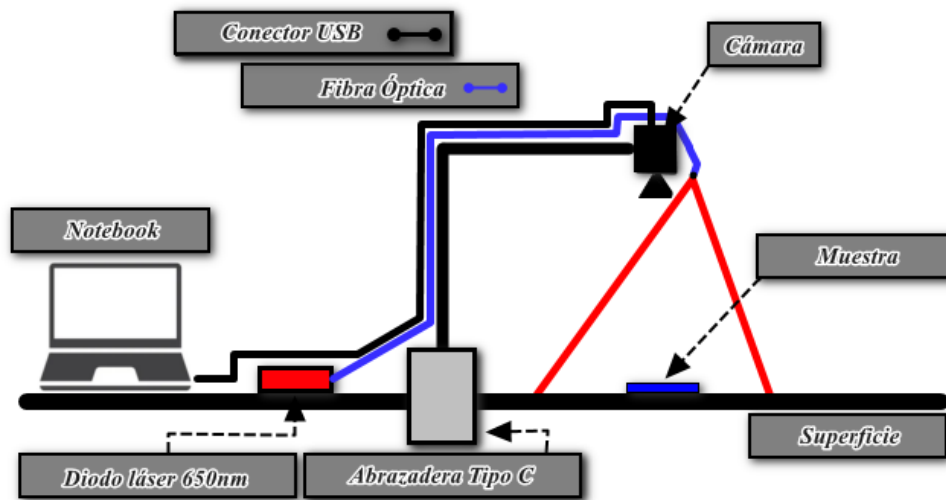


Fig 26. Esquema de sistema propuesto.

A partir de este esquema se pueden identificar los elementos principales para la generación y adquisición de un patrón de speckle dinámico:

- El **diodo láser** por utilizar corresponde a un detector de fallas para fibra óptica, presenta una longitud de onda de 650 nm y una potencia de 30 mW.
- La **fibra óptica** corresponde a la referencia **P1-630PM-FC-2** de Thorlabs, con una longitud de onda operable de 620 – 850 nm, una longitud de dos metros.
- La **cámara** por utilizar es el modelo **acA640-750uc** de Basler, corresponde a una cámara CMOS con una resolución de 640 px x 480 px.
- El **lente** por utilizar corresponde al modelo **C23-1616-2M-S f16mm** de Basler, con iris y zoom variable.
- El **Notebook** es utilizado para el procesamiento de imágenes obtenidas a partir de los distintos algoritmos mencionados, el modelo de este corresponde a un **HP Pavilion x360**.

El **diodo láser** será la fuente de luz coherente en este experimento, el láser presente en el laboratorio contiene un acople a fibra óptica, con una potencia de 30 mW y una longitud de onda de 650 nm presente en la figura 27.



Fig 27. Diodo láser presente en laboratorio.

La cámara **acA640-750uc** (ver figura 28) de Basler posee un sensor CMOS con dimensiones 3.1 mm x 2.3 mm, permitiendo una resolución de 640 x 480 píxeles, alcanzando un ratio de captura máximo de 720 fps, su conexión es mediante USB 3.0 Micro B sl/A.

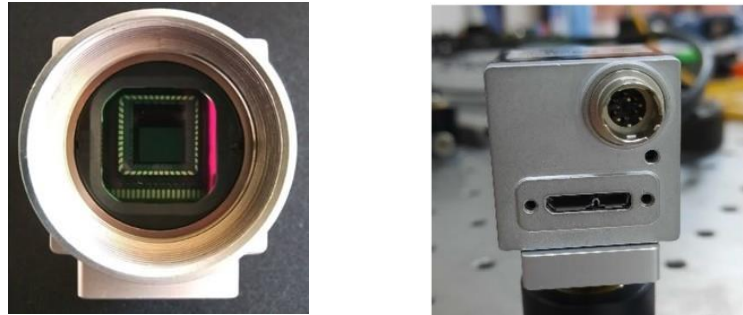


Fig 28. Cámara CMOS a utilizar.

El **lente C23-1616-2M-S f16mm** (ver figura 29) de Basler el cual posee una conexión c-mount, una distancia de foco fija de 16 mm, además de poseer un formato de sensor de 2/3" compatible con la cámara a utilizar, su iris varía de F1.6 a F22 (cantidad de luz que pasa sobre el lente) y una resolución de 2 megapíxeles.



Fig 29. Lente a utilizar marca Basler (C23-1616-2M-S f16mm).

A partir de la longitud de onda del láser y de los parámetros del lente es posible determinar la resolución teórica del sistema óptico, esto utilizando las ecuaciones (2) y (3) presentes en el marco teórico.

La apertura por utilizar para determinar la resolución del sistema corresponde a la F22, que corresponde a la apertura mínima del iris (ya que normalmente se busca filtrar la luz de los alrededores, se utiliza una apertura mínima del iris).

$$Resolución (r) = \frac{0.65 \mu m}{2 \cdot AP}$$

Sin embargo, en este caso necesitamos convertir la apertura F22 en un valor numérico para realizar el cálculo. La relación F_n se refiere al cociente entre la distancia focal y el diámetro de la apertura del lente. Para F22, esto significa que el diámetro de la apertura sería 1/22 del valor de la distancia focal.

Dado que la distancia focal es de 16 mm, podemos calcular el diámetro de la apertura para F22:

$$AP = \frac{16 \text{ mm}}{22} = 0.727 \text{ mm}$$

Ahora, podemos calcular la resolución utilizando este diámetro de apertura:

$$Resolución (r) = \frac{0.65 \mu m}{2 \cdot 0.727 \text{ mm}} = 0.447 \mu m$$

Por lo tanto, con la apertura mínima del lente Basler Lens C23-1616-2M-S (F22), la resolución del sistema sería de aproximadamente 0.447 [μm].

El cuerpo principal (ver figura 28) tiene la función de sostener la cámara y permitir un rango de movimiento para obtener imágenes nítidas de lo que se desea observar. En nuestro caso, se realizó una modificación en un brazo articulado de aluminio de la marca VIJIM, modelo LS08. Se retiró una de las extensiones del brazo y se cortó la extensión restante, dejando el cuerpo principal con un brazo con agarre tipo C en el lado inferior, en la parte superior de este brazo se colocó una rótula universal de 360°, que se conecta a la extensión recortada, la cual posee otra rótula universal de 360° en el extremo final. Esta última rótula se conecta a la cámara con una extensión que permite remover la cámara en caso de ser necesario.

En la figura 30 se muestra el brazo articulado y los movimientos permitidos gracias a las uniones mencionadas.

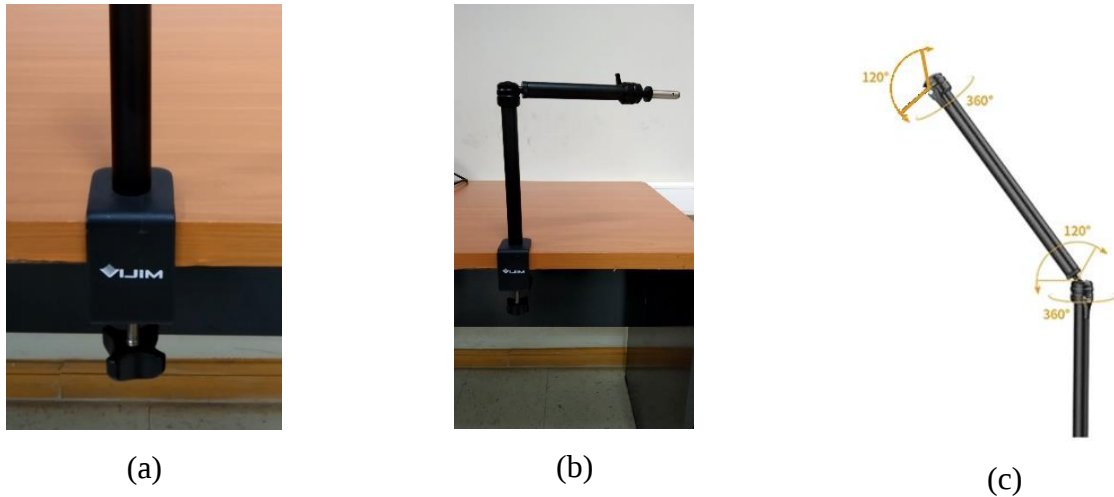


Fig 30. (a) agarre tipo C, (b) brazo articulado modificado, (c) ángulos de movimiento permitidos por el brazo articulado.

La fuente de luz utilizada corresponde a un diodo láser para detección de fallas en fibra óptica, este tiene una longitud de onda de 650 nm y una potencia de 30 mW, además, este láser se caracteriza por tener un conector universal que permite un acople con las fibras ópticas tipo FC/PC, permitiendo una conexión más fácil con la fibra óptica y reduciendo las pérdidas de intensidad que ocurren dado a una mala posición en la conexión entre estos dos elementos. (ver figura 31).



Fig 31. Ejemplo de diodo láser y fibra óptica antes y después de la conexión.

Este diodo láser se alimenta mediante el uso de dos pilas AA, lo cual podría ser perjudicial para trabajar durante largos periodos de tiempo, por lo que se optó por desarmar el diodo láser (ver figura 32) y solar dos cables jumpers al puerto de alimentación del circuito para ser conectados a una fuente de voltaje variable para mantener una alimentación constante durante las pruebas, asegurando que la intensidad de iluminación no presentará variaciones drásticas. Para este propósito, se utilizó una fuente de alimentación variable de la marca ELE-TECH, modelo HY3005B, que ofrece un rango

de voltaje de 0 a 30 [V] y corriente de 0 a 5 [A]. Durante las pruebas, se estableció un voltaje de 3,3 [V] y una corriente de 170 [mA] para el diodo láser.



Fig 32. Diodo láser desarmado con dos cables jumper para alimentación.



Fig 33. Fuente de poder ELE-TECH modelo HY3005B.

La fibra óptica **P1-630PM-FC-2** (ver figura 34) de Thorlabs permite trabajar con longitudes de onda de 620 a 850 nm, posee una longitud de 2 metros de largo y conectores tipo FC/PC a los extremos. Esta se caracteriza por ser una fibra PM o polarización mantenida lo que permite mantener constantes las características de la luz que incide en la fibra óptica.



Fig 34. Fibra óptica P1-630PM-FC-2.

El extremo opuesto de la fibra óptica está acoplado a un soporte ubicado al costado de la cámara mediante una placa metálica a la cual se le incorporó un soporte tipo bola, este soporte tipo bola tenía acoplado ángulo fijo al cual se le realizó un orificio para encajar el extremo final de la fibra óptica mediante una unión tipo FC/PC. El soporte tipo bola permite ajustar la inclinación de la luz láser en el sistema permitiendo un movimiento angular de 360°. Esto resulta especialmente útil cuando se trabaja con muestras ubicadas a diferentes alturas, ya que el enfoque del lente lo permite. En la

figura 35 se puede apreciar dos vistas de cómo se encontraba la fibra óptica acoplada al soporte anexo a la cámara.



(a)



(b)

Fig 35. Vista superior (a) y frontal (b) de la cámara.

4.2 Configuración de cámara mediante Software Pylon Viewer.

La cámara acA640-750uc se conecta al Notebook del laboratorio mediante un cable USB 3.0 Micro B sl/A. Se utiliza el software gratuito de Basler llamado Pylon Viewer para configurar los parámetros de la cámara, realizar la adquisición de imágenes y definir los lugares de guardado. A continuación, se describen las configuraciones realizadas para la captura de imágenes.

Para comenzar, se debe conectar la cámara utilizando la ventana "Devices". En caso de que la cámara no aparezca en la ventana principal del software, se puede activar desde la pestaña "Window" en la barra de herramientas del software. Una vez detectada la cámara, se realiza la conexión haciendo doble clic en la cámara detectada, en este caso, Basler acA640-750uc (ver figura 36.1).

Para modificar las propiedades de la cámara, es necesario mostrar la ventana "Features - All" desde la pestaña "Window" en la barra de herramientas del software. En la ventana "Features - All", se encuentran varios parámetros que se pueden cambiar. A continuación, se especifican estos parámetros:

- En la sección "Image format", es necesario cambiar el "Pixel Format" a "RGB 8". Esto aumenta el tamaño de pixel a 24 Bits/Pixel, lo cual mejora la resolución de la cámara y el formato de colores utilizado (ver figura 36.2).
- En la sección "Image Quality Control", es necesario apagar las fuentes de luz preestablecidas para obtener una imagen sin luz artificial (ver figura 36.3).

- En la sección "Acquisition Control", se debe modificar el parámetro "Exposure Time [us]" a un total de 45000. Este parámetro indica cuánto tiempo se desea que el sensor esté expuesto, lo que permite que el sensor reciba más luz (ver figura 36.4).

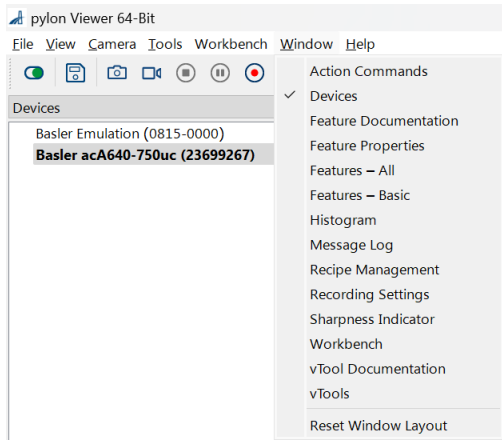


Fig 36.1 Ventana "Devices". Software Pylon Viewer.

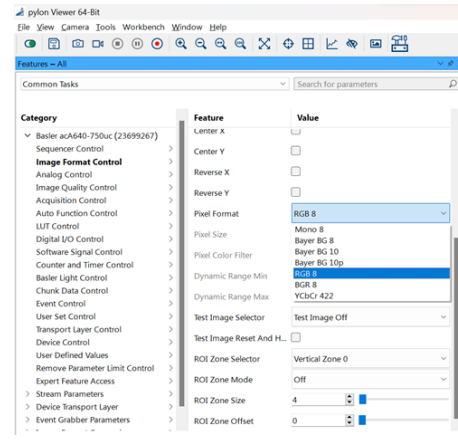


Fig 36.2 Ventana "Features", sección Image Format Control. Software Pylon Viewer.

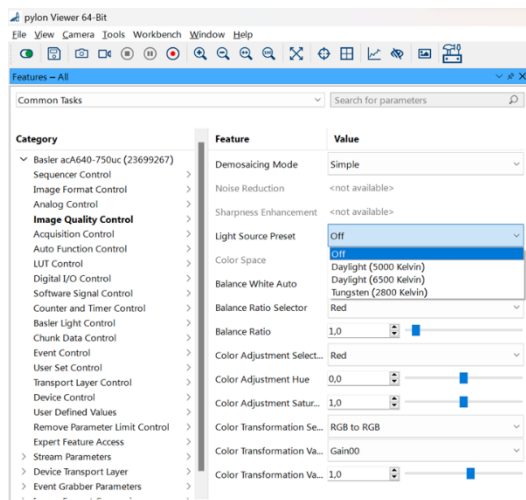


Fig 36.3 Ventana "Features", sección Image Quality Control. Software Pylon Viewer.

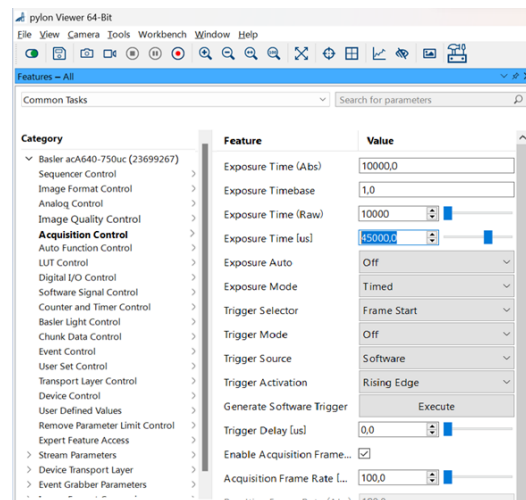


Fig 36.4 Ventana "Features", sección Acquisition Control. Software Pylon Viewer.

Con los parámetros configurados anteriormente, procedemos a trabajar en una nueva ventana denominada "Recording Settings". Para hacerla visible, se activa desde la pestaña "Window" en la barra de herramientas del software. Esta ventana permite configurar las opciones de grabación de la cámara, y se deben seleccionar los siguientes elementos (ver figura 36.5):

- En nuestro caso se requiere una secuencia de imágenes, por lo que seleccionamos “Sequence of still images”.
- En Output format seleccionamos el formato a utilizar, que será Bitmap.
- Record a frame every permite determinar cada cuanto se requiere tomar una imagen, este valor será identificado más adelante.
- Luego se “tickea” la opción de “stop recording” y se selecciona el tiempo y unidad de medida a utilizar.

En el directorio de "Output folder", se selecciona la ubicación donde se desean guardar las imágenes capturadas. Es importante destacar que el software tiene la capacidad de crear carpetas. Por ejemplo, si se trabaja con un directorio de tipo "Escritorio\Medicion1" y la carpeta "Medicion1" no existe, el software la creará y guardará las imágenes en esa carpeta.

El guardado de las imágenes ocurre de forma secuencial, es decir, el software las guarda en el orden en que se capturaron. Esto se puede identificar mediante los últimos 4 números presentes en el nombre de la imagen guardada (ver figura 36.6).

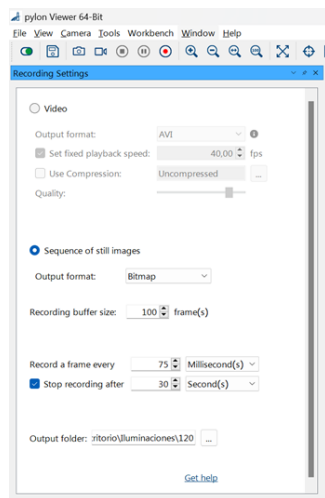


Fig 36.5 Ventana “Recording Settings”, sección Image Quality Control. Software Pylon Viewer.

Basler_acA640-750uc_23699267_20230616_155846882_0000
 Basler_acA640-750uc_23699267_20230616_155846882_0001
 Basler_acA640-750uc_23699267_20230616_155846882_0002
 Basler_acA640-750uc_23699267_20230616_155846882_0003
 Basler_acA640-750uc_23699267_20230616_155846882_0004
 Basler_acA640-750uc_23699267_20230616_155846882_0005

Fig 36.6 Ejemplo de guardado de imágenes.

Finalmente, se presenta el sistema óptico portable desarrollado en la figura 37, el cual será evaluado mediante distintas pruebas de micro movilidad.



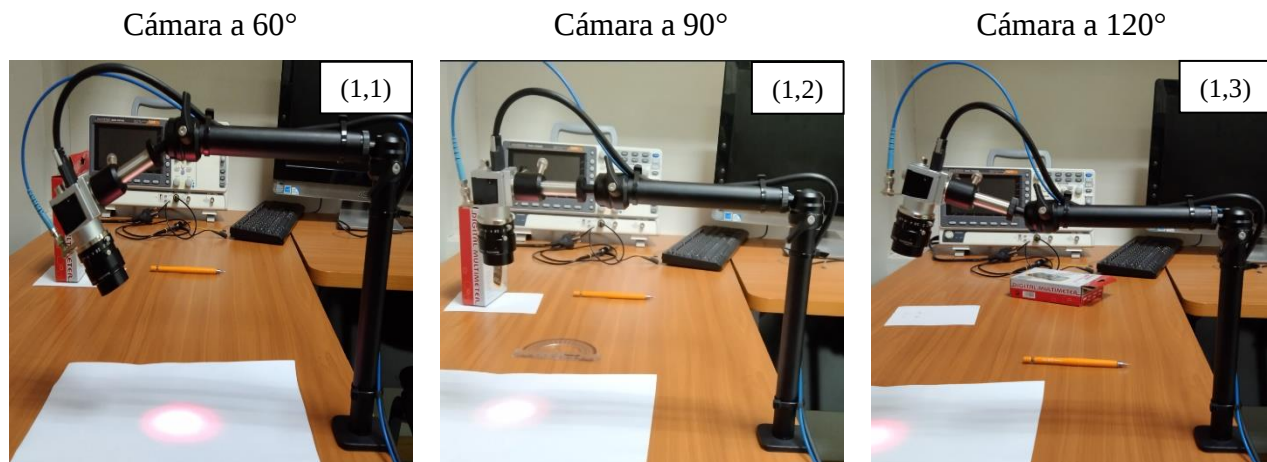
Fig 37. Sistema óptico portable.

4.3 Pruebas de Iluminación.

Las pruebas de iluminación tienen como finalidad caracterizar el sistema, analizar cómo se comporta y verificar los perfiles de iluminación generados por el sistema óptico portable.

La primera prueba fue realizada para estudiar la iluminación generada por el sistema óptico portable en distintos ángulos de aproximación a la muestra.

Esto se realizó variando solamente la rótula universal de 360° presente al final de extinción del brazo articulado, donde el posicionamiento de la cámara tomó ángulos de 60°, 90° y 120° respecto a la horizontal del brazo articulado. A partir de esta prueba se obtuvieron los resultados presentes en la figura 38.



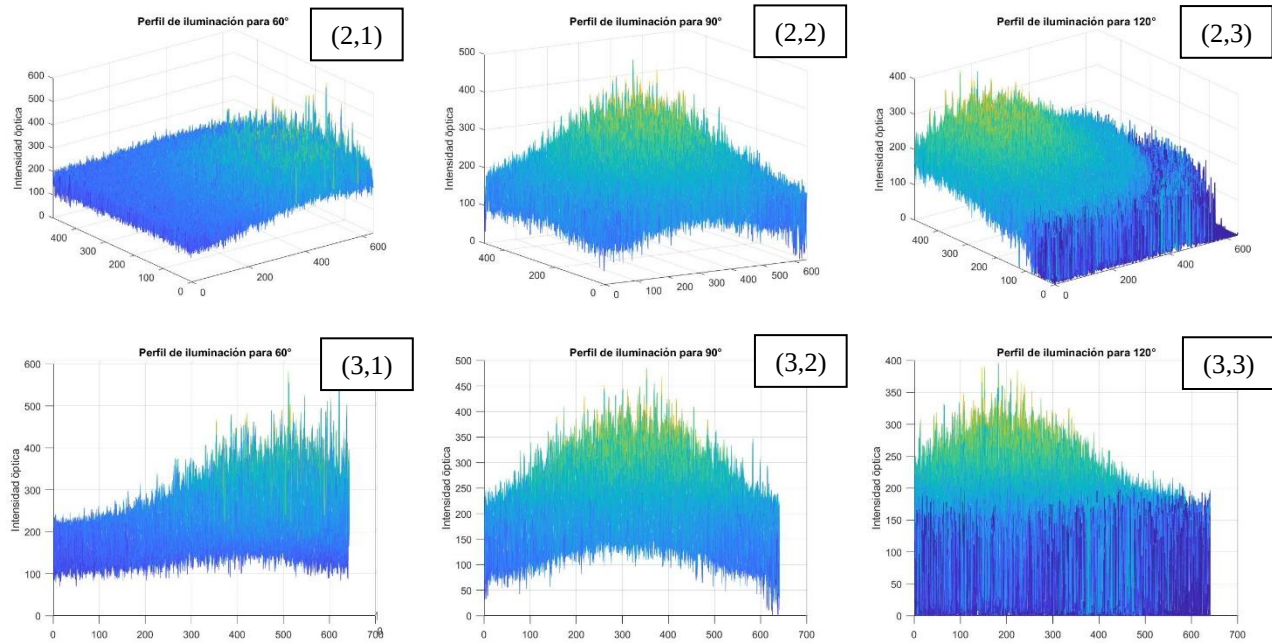


Fig 38. Perfil de iluminación obtenido a partir de diferentes ángulos de aproximación.

Con los perfiles de iluminación obtenidos en la figura 38 se aprecia que trabajar con la cámara a ángulos distintos de 90° genera una pérdida de la iluminación gaussiana, generando perfiles desplazados dado el ángulo utilizado, en 60° (3,1) la iluminación gaussiana se desplaza al lado derecho, mientras que con 120° (3,3) se desplaza al lado izquierdo, además de presentar un “*efecto de borde*” dado a la mala iluminación generada en este punto.

Si bien realizando empleando este método se está variando la distancia original de la fuente de luz a la superficie, esta afecta al tamaño generado de iluminación e intensidad y no a la forma generada por los distintos ángulos utilizados, los cuales generan una pérdida de la iluminación gaussiana. A partir de esto, se priorizará trabajar con un ángulo de 90° respecto a la horizontal.

La **segunda prueba** consistió en analizar el perfil de iluminación obtenido por el sistema en dos sectores del laboratorio (ver figura 39), en ambos sectores se realizaron pruebas de 30 segundos, con una tasa de captura de 15 fps, obteniendo los perfiles presentados en la figura 40.



(a)



(b)

Fig 39. Primer (a) y segundo (b) sector a evaluar el sistema óptico.

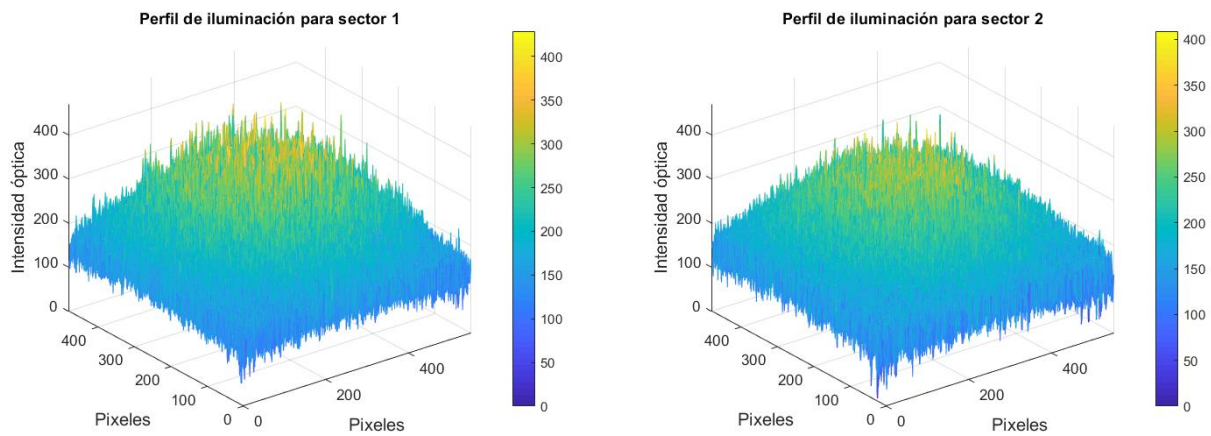


Fig 40. Perfil de iluminación obtenido a partir del sistema óptico.

Analizando la figura 40, se aprecia que el sistema está generando un perfil de iluminación gaussiano en ambos sectores del laboratorio, donde sus intensidades son bastante similares, puede que esta pequeña diferencia sea generada por fuentes de iluminación externas, o una pequeña variación de potencia entregado por el diodo láser, pero este perfil gaussiano sigue siendo ideal para continuar con el experimento, ya que los algoritmos de procesamiento normalizados son capaces de filtrar y permiten una cuantificación de movimiento de la medición.

4.4 Pruebas de secado de pintura.

En la sección anterior se realizaron pruebas de iluminación, donde se quería analizar el perfil de iluminación obtenido, ahora se trabajarán pruebas con muestras variables en el tiempo, para este caso, el secado de un corrector para lapicera, simulando el secado de pintura. Este corrector se presenta en formato de frasco y era de la marca Wilson (ver figura 41). Se decidió utilizar este tipo de pintura ya que presenta un secado más rápido.

Para llevar a cabo esta prueba, se aplicó el corrector para lapicera utilizando el pincel que venía incluido, sobre una hoja blanca que contenía impresos varios círculos de 1 cm de diámetro. Estos círculos estaban impresos en la hoja, delimitando así el área de aplicación del corrector. Cada uno de estos círculos fue evaluado de manera individual en cada prueba, en la figura 42 se observa cómo se realizó esta prueba.



Fig 41. Corrector utilizado

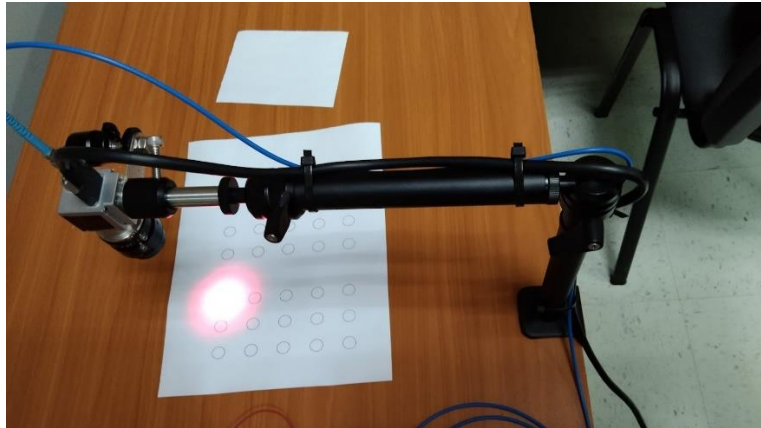


Fig 42. Prueba de secado de pintura.

Durante esta prueba se realizaron capturas de imágenes durante un periodo de 1 minuto y 30 segundos a una frecuencia de captura de 15 fps, lo que resultó en un total de 1350 imágenes por cada prueba en cada sector del laboratorio. Estas imágenes se utilizaron para analizar el comportamiento del sistema óptico con relación al secado de pintura en una superficie aplicando algoritmos de procesamiento de imágenes. Los algoritmos de procesamiento de imágenes evaluados fueron Diferencias Generalizadas y DJC para los no normalizados y LSI, NDJC y FUJII para los algoritmos normalizados. Obteniendo los siguientes perfiles de actividad para el primer sector del laboratorio (Sect.1) y el segundo sector del laboratorio (Sect.2)

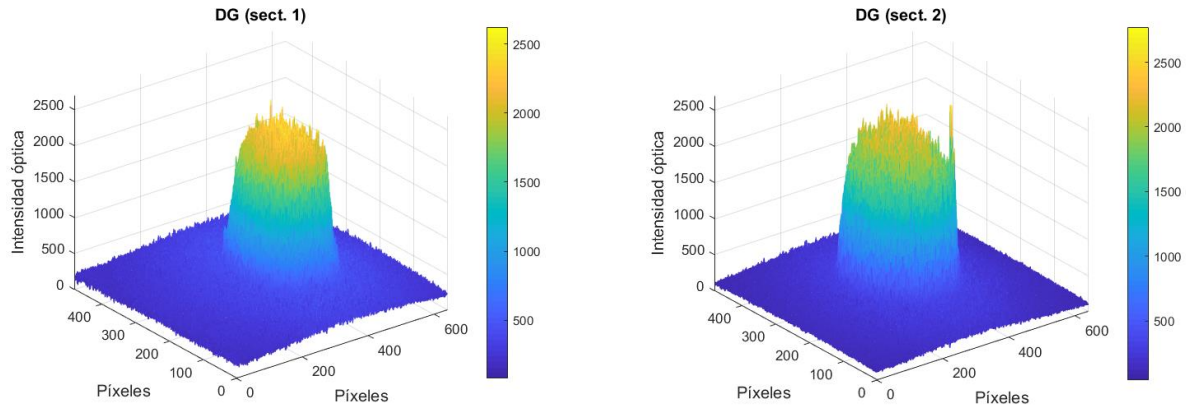


Fig 43. Perfil de movilidad obtenido mediante algoritmo Diferencias Generalizadas.

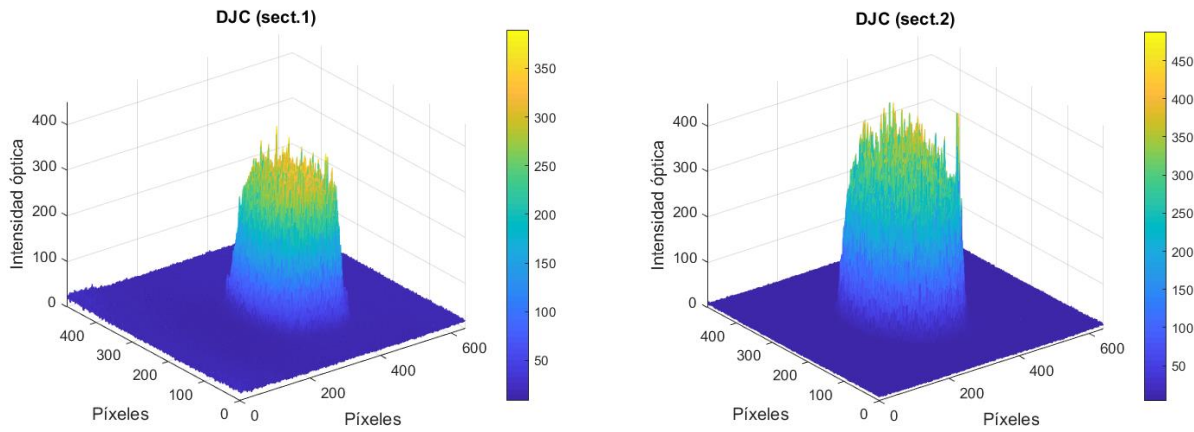


Fig 44. Perfil de movilidad obtenido mediante algoritmo DJC.

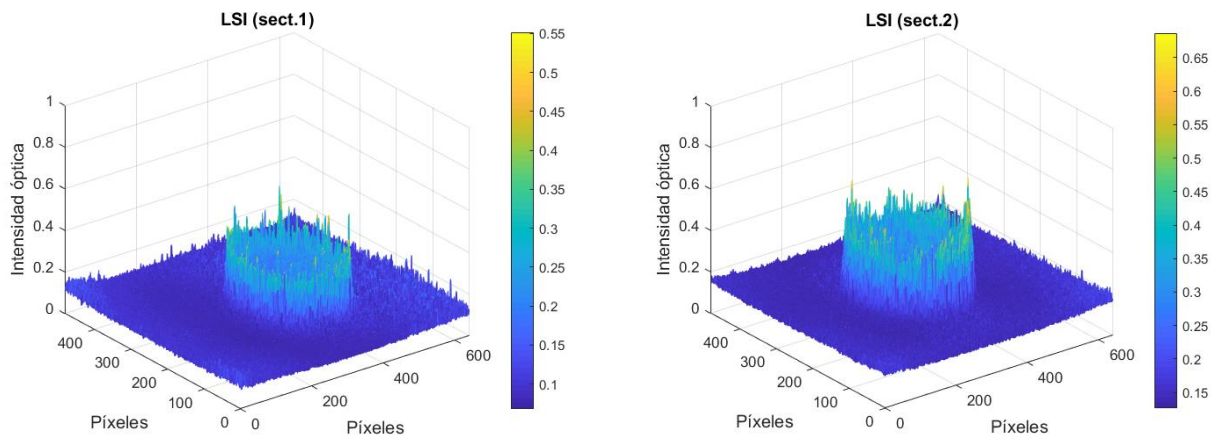


Fig 45. Perfil de movilidad obtenido mediante algoritmo LSI.

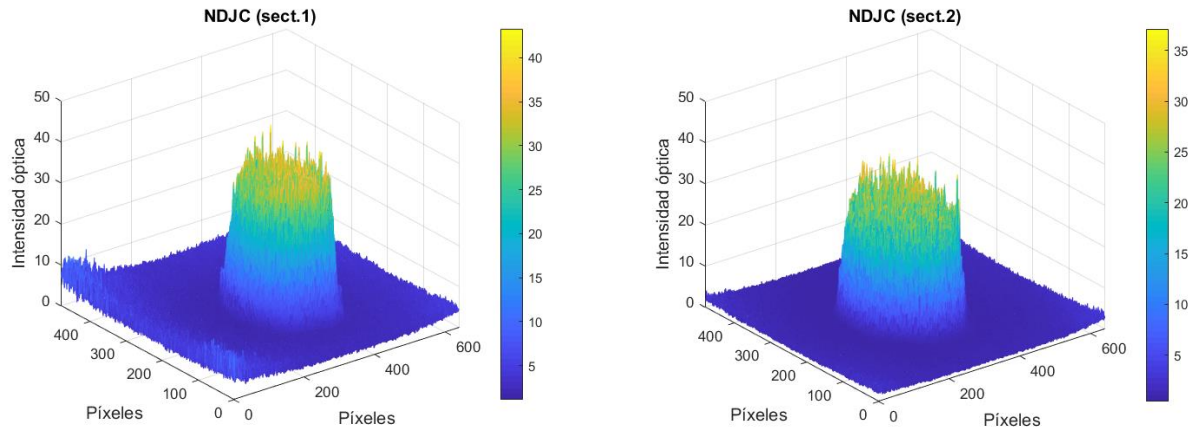


Fig 46. Perfil de movilidad obtenido mediante algoritmo NDJC.

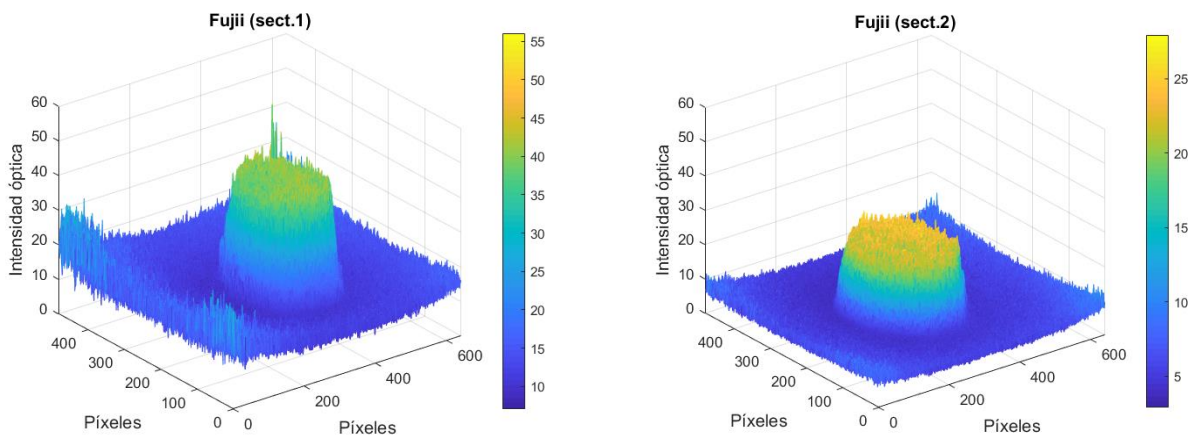


Fig 47. Perfil de movilidad obtenido mediante algoritmo Fujii.

Con el análisis de estas figuras, se puede apreciar la diferencia entre los algoritmos de procesamiento de imágenes no normalizados y los algoritmos de procesamiento de imágenes normalizados, donde el algoritmo DG muestra un perfil de actividad con forma gaussiana, mientras que los algoritmos normalizados logran corregir esta iluminación gaussiana, lo que resulta en la representación de un cilindro que indica el área donde se aplicó la pintura y un fondo plano, sin embargo, mediante la eliminación de la información gaussiana se presenta un fondo con perturbaciones en algunos algoritmos como Fujii.

4.5 Métrica de precisión en detección de movilidad.

Con el fin de determinar la calidad del algoritmo utilizado, se decidió analizar cada uno de ellos con una métrica de “precisión en la detección de movilidad”, la cual se define mediante la ecuación (15). En esta ecuación, TP (true positive o verdadero positivo) corresponde a una zona de actividad que concuerda con la actividad medida, mientras que FP (false positive o falso positivo) se refiere a una zona de actividad que presenta actividad, pero no se corresponde con la actividad medida.

$$precisión = \frac{TP}{TP + FP} \quad (15)$$

Para aplicar esta métrica se seleccionó una región de 80 x 80 píxeles, considerando 1 TP y 4 FP, obteniendo la figura 48 como ejemplo:

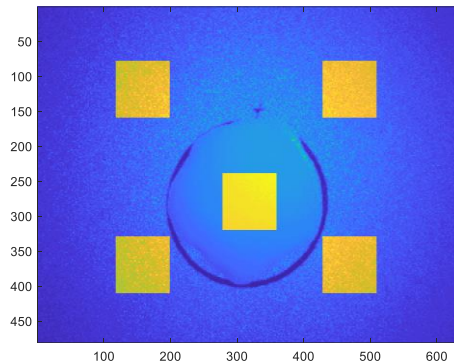


Fig 48. Métrica de precisión de detección de movilidad aplicada a ambos sectores del laboratorio.

Esta métrica de precisión se aplicó a las pruebas obtenidas en ambos sectores del laboratorio. Donde se evaluaron tanto algoritmos no normalizados como normalizados, incrementando la cantidad de capturas de 50 en 50 hasta llegar a 1000.

Los resultados se presentan en la figura 49, que contiene el comportamiento de la precisión del algoritmo utilizado respecto a la cantidad de capturas utilizadas para ambos sectores del laboratorio, donde el asterisco (*) presente en la gráfica corresponde al máximo de precisión en detección de movilidad.

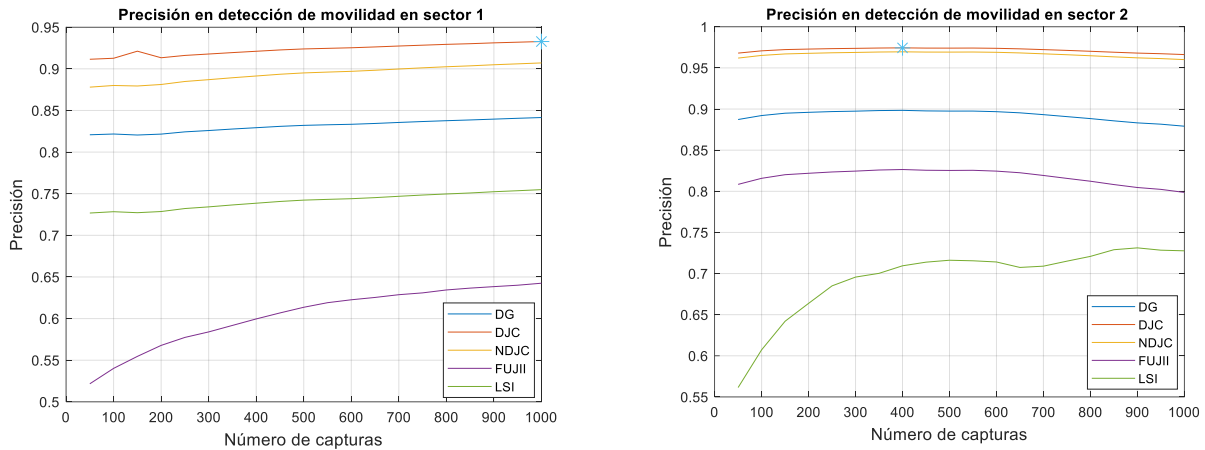


Fig 49. Análisis de métrica de precisión en ambos sectores del laboratorio.

Al comparar los resultados del mejor y peor descriptor en cada sector se ven los siguientes perfiles de actividad en la figura 50:

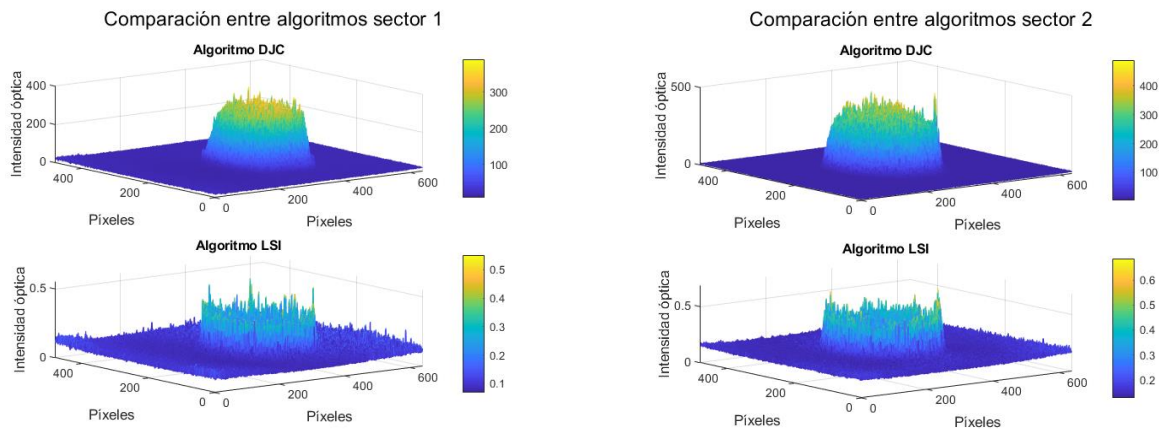


Fig 50. Comparación entre mejor y peor algoritmo por sector.

Desde la figura 49, se puede observar que a medida que el número de capturas aumenta, los algoritmos muestran una mayor precisión en la detección de movilidad. No obstante, en el segundo sector analizado, este incremento de precisión solo se mantuvo hasta alcanzar un máximo de 400 capturas, a partir del cual la precisión comenzó a disminuir. En la figura, se utiliza un asterisco (*) para indicar el punto de máxima precisión en cada sector evaluado. Los valores máximos obtenidos correspondieron a los algoritmos DJC y NDJC, los cuales alcanzaron 0.97 y 0.96 respectivamente, utilizando 400 capturas en el segundo sector del laboratorio.

Esta tendencia puede ser influenciada por la no total reproducibilidad de las pruebas en ambos sectores. Esto se debe a que, si bien se limitó el área de aplicación de pintura, no se controló la cantidad de esta.

Continuando con la figura 50, si bien no se puede comparar los valores de intensidad óptica en los distintos algoritmos ya que poseen un distinto índice de intensidad se puede estudiar el perfil de movilidad obtenido mediante los dos algoritmos, donde DJC, que es intrínsecamente normalizado, logró filtrar gran parte de la iluminación gaussiana, dejando el fondo de la muestra plano, mientras que LSI lo logró pero en una calidad menor, dado a estas perturbaciones en el fondo, se infiere que el índice de precisión bajó para el algoritmo LSI. Si bien en el segundo sector LSI se comportó de mejor manera, DJC mantiene una consistencia para ambos sectores.

Estas pruebas nos brindan una idea de cómo se comportarán los algoritmos en función del número de capturas utilizadas. Considerando esta información, se ha decidido emplear un total de 400 capturas en las pruebas subsiguientes. Para un análisis más detallado de estos valores, se pueden consultar los resultados correspondientes a cada sector en el Anexo A.

Capítulo 5. Evaluación de micro actividad con sistema óptico portable

5.1 Desarrollo de estudio gravimétrico.

En esta sección se presentará la configuración para medir micro actividad utilizando el sistema óptico portable desarrollado, donde se identificará los elementos a utilizar, el proceso del estudio, sus resultados y discusiones.

El secado de pintura conlleva un movimiento microscópico dado a la evaporación producida de los componentes más volátiles de esta. Los componentes que se evaporan principalmente son solventes los cuales le proporcionan fluidez a las pinturas para lograr ser aplicadas de forma líquida, los solventes que normalmente utilizan las pinturas acrílicas corresponden a agua y disolventes orgánicos (como el alcohol isopropílico o etílico). La evaporación de estos solventes produce una pérdida en el peso de la pintura dado a la pérdida de estas moléculas. En resumen, la pintura presenta más peso cuando se encuentra en forma líquida, pero a medida que se seca, ocurre un movimiento microscópico debido a la evaporación y reacomodación de moléculas dentro de la pintura, lo cual conlleva una pérdida de peso al evaporarse las moléculas volátiles de la pintura [23][24].

La finalidad es estudiar gravimétricamente una cantidad de pintura, utilizando una balanza y el sistema óptico portable.

La variación del peso de la pintura en la muestra se realizará utilizando una balanza profesional de la marca EXCELL, modelo BH3-300. Esta balanza presentaba una precisión de 0,005 gramos, como se muestra en la figura 51.

La muestra por analizar en este ensayo será una placa producida en el laboratorio de optoelectrónica a través de impresión 3D, estas placas tienen una dimensión de 3 cm de ancho, 3 cm de largo y 0,5 cm de alto, con una perforación central de 1 cm de ancho, 1 cm de largo y 0,12 cm de profundidad. De esta manera, se limitó la cantidad de pintura que se puede incorporar en la muestra. El diseño de esta placa se puede apreciar en la figura 52.

Se realizarán cuatro ensayos por sector, en distintos sectores del laboratorio, estos serán ensayos repetitivos, utilizando una placa con la misma profundidad en cada una de las pruebas con la finalidad de comparar los resultados y evaluar la portabilidad del sistema.



Fig 51. Balanza EXCELL BH3 - 300.

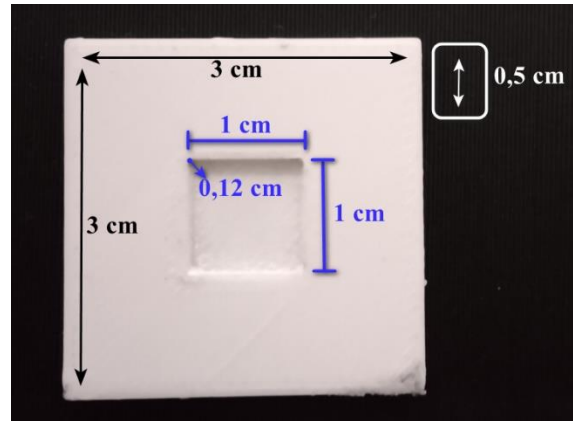


Fig 52. Placa diseñada en impresión 3D.

Dimensiones 1 x 1 x 0,5 cm.

Los ensayos consistieron en incorporar la pintura en las placas con profundidades diseñadas, hasta llegar al nivel de la perforación. Se tomaron 400 imágenes durante lapsos de 30 segundos al inicio y cada vez que se produjo una variación en el peso de la muestra. También se registró el tiempo en que ocurrió la variación y el valor correspondiente del peso medido por la balanza.

5.2 Resultados obtenidos para primer sector del laboratorio.

Se presenta nuevamente en la figura 53 el lugar donde se realizó el primer estudio, mientras que la tabla 3 muestra los pesos obtenidos y las variaciones registradas a lo largo del tiempo para la primera prueba realizada.



Fig 53. Sector del laboratorio donde se realizó el primer ensayo gravimétrico.

Tabla 3: Variación de peso en la muestra. Prueba 1.

Tiempo (HH:MM:SS)	Peso (g)
0:00:00	0,0700
0:01:50	0,0650
0:04:05	0,0600
0:06:55	0,0550
0:11:40	0,0500
0:20:00	0,0450
0:38:50	0,0400

La muestra inicialmente tenía un peso de 70 [mg], y se observaron sus variaciones de peso durante un periodo de 40 minutos. Se tomaron imágenes en los momentos de variación de peso, y se

analizó el perfil de movilidad de la muestra utilizando los algoritmos de procesamiento de imágenes mencionados anteriormente.

5.2.1 Perfil de movilidad microscópica.

A través de Matlab, se obtuvieron las siguientes figuras que muestran los perfiles de movilidad utilizando los algoritmos DJC y NDJC como ejemplo (ver figura 54). Ver Anexo B para los demás algoritmos.

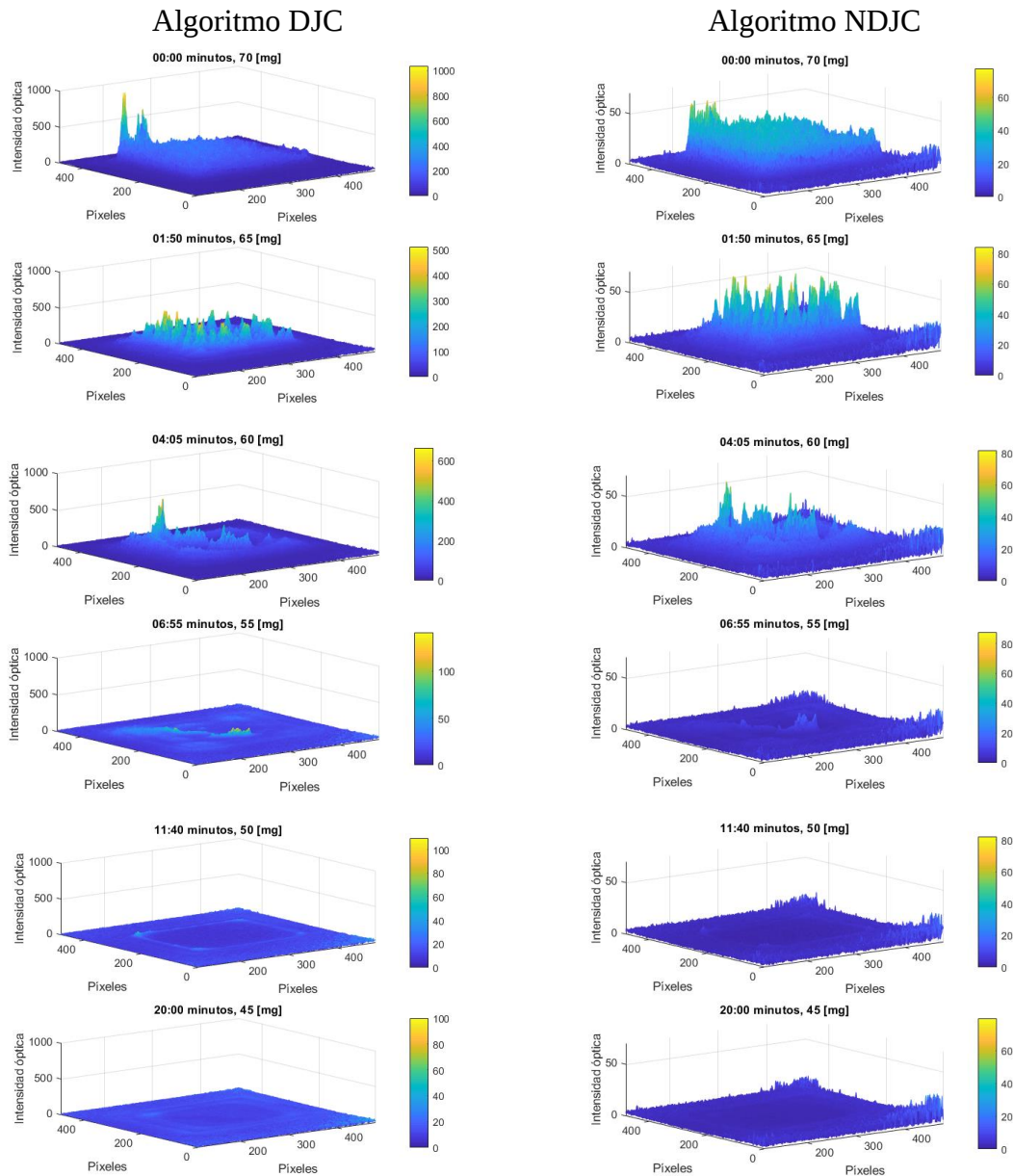


Fig 54. Comportamiento de perfil de actividad obtenido mediante algoritmos DJC y NDJC.

A partir de las gráficas de la figura 54, se puede observar cómo el algoritmo NDJC presenta una respuesta normalizada donde reduce significativamente el brillo que DJC interpreta como "mucho

movimiento", sin embargo, este también interpreta las diferencias entre sombra de cada toma como movimiento al exterior de donde se aplicó el corrector, pero dado a que se analizará solo el área donde se aplicará el corrector, no afectará en la evaluación del sistema.

5.2.2 Promedio de actividad en la muestra.

Utilizando las matrices de actividad obtenidos de todos los algoritmos, se calculó un promedio de la actividad en la muestra desde los algoritmos mencionados. Para este propósito, se definieron dos áreas de trabajo: M1, con dimensiones de 160 x 160 píxeles, y M2, con dimensiones de 240 x 240 píxeles, estas áreas permitirán evaluar el comportamiento del algoritmo para distintos tamaños de muestra, sin embargo, dado a que presentan la misma profundidad y cantidad de líquido los resultados de estos promedios deberían ser similares, cada uno de estos pixeles equivalen a 4,2 mm aproximadamente. Ambas áreas se encuentran en el centro de la muestra, correspondiendo a la perforación de 1 x 1 x 0,12 cm. Estas áreas de trabajo se presentan en las figuras 55 y 56.

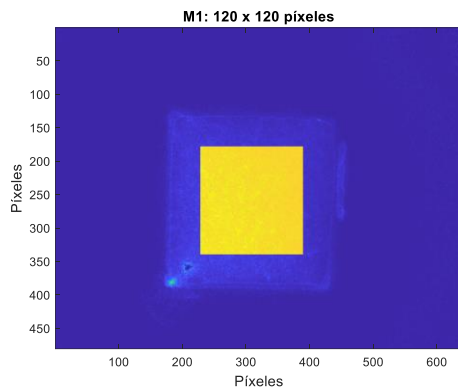


Fig 55. Área de trabajo por abarcar en M1

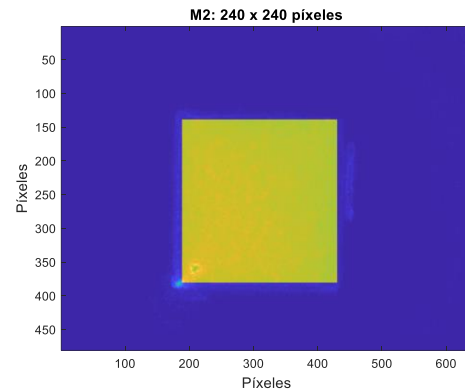


Fig 56. Área de trabajo por abarcar en M2

Se determinó el promedio de actividad presente en la muestra para diferentes áreas de trabajo y algoritmos utilizados, resultados que, se presentan las tablas 4 y 5 correspondientes a cada área de trabajo. Ver Anexo C para los resultados en las otras pruebas.

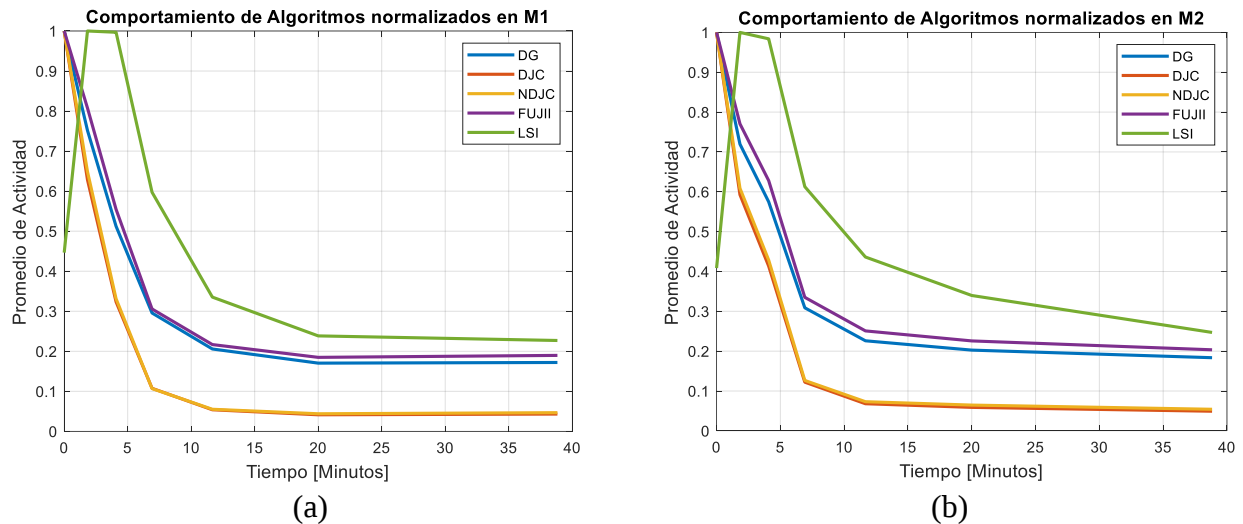
Tabla 4: Promedio de actividad Prueba 1 (M1) para primer sector.

Tiempo (HH:MM:SS)	Peso (g)	DG	DJC	NDJC	FUJII	LSI
00:00	0,070	1.263,28	190,71	28,53	36,95	0,24
01:50	0,065	949,37	119,83	18,51	29,84	0,53
04:05	0,060	647,17	61,71	9,45	20,49	0,53
06:55	0,055	373,50	20,51	3,05	11,30	0,32
11:40	0,050	259,96	10,29	1,58	8,01	0,18
20:00	0,045	215,31	7,90	1,26	6,83	0,13
38:50	0,040	217,36	8,24	1,33	7,01	0,12

Tabla 5: Promedio de actividad Prueba 1 (M2) para primer sector.

Tiempo (HH:MM:SS)	Peso (g)	DG	DJC	NDJC	FUJII	LSI
00:00	0,070	1.157,12	173,06	26,94	36,32	0,23
01:50	0,065	832,69	102,57	16,40	27,99	0,57
04:05	0,060	665,16	71,57	11,55	22,82	0,56
06:55	0,055	357,37	21,15	3,41	12,17	0,35
11:40	0,050	261,57	11,78	1,97	9,11	0,25
20:00	0,045	234,50	10,20	1,74	8,20	0,19
38:50	0,040	212,43	8,52	1,46	7,39	0,14

Para analizar datos, se presenta el tiempo de variación y el promedio de actividad en la muestra obtenida por cada algoritmo para cada área de trabajo. Estos datos proporcionarán una visión más detallada de cómo varía el promedio de actividad de la muestra a lo largo del tiempo en relación con los distintos algoritmos y áreas de trabajo utilizados. Los datos de estas variables se encuentran normalizadas para permitir un análisis en conjunto de los algoritmos y se pueden ver en la figura 57.

**Fig 57. Comportamiento de promedio de actividad en la muestra para área de trabajo M1 (a) y M2 (b).**

Analizando estas gráficas, se puede observar que la mayoría de los algoritmos exhiben un comportamiento directamente proporcional, que es esperado según la bibliografía estudiada [18]. En general, la actividad disminuye de manera exponencial en función del tiempo, como se había anticipado. Sin embargo, el algoritmo LSI muestra un patrón atípico. Esto tiene coherencia con los datos obtenidos mediante las tablas 4 y 5, donde sus promedios no disminuían en función del tiempo.

5.2.3 Correlación entre peso y actividad microscópica.

Obtener una correlación entre el peso y el promedio de actividad obtenido mediante distintos algoritmos de procesamiento de imágenes nos dará información respecto a la dependencia de las variables, indicando si el sistema óptico está entregando resultados coherentes respecto a la teoría en secado de pintura, la cual nos indicaba que a medida que la muestra se seca, se presentará una menor actividad microscópica.

Este análisis se lleva a cabo a partir de un gráfico de dispersión creado en Excel, el cual permitirá visualizar la relación entre el peso y el promedio de actividad en la muestra y obtener su índice de correlación.

A continuación, se presenta un ejemplo en la figura 58 del gráfico de dispersión obtenido para el algoritmo DG, el resto de los resultados se presentarán en la tabla 6, sintetizando la información de las gráficas de dispersión.

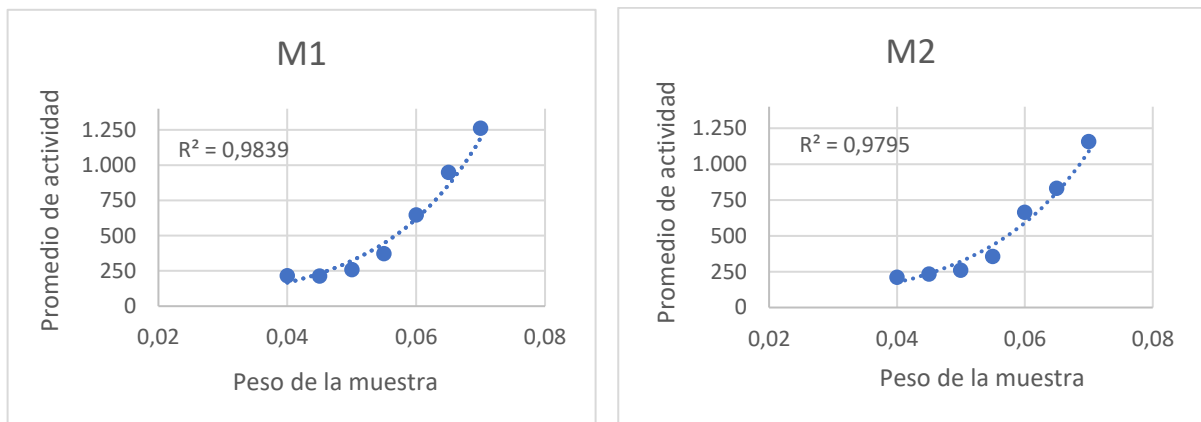


Fig 58. Graficos de dispersión para algoritmo DG con area de trabajo M1 y M2. Prueba 1.

La tabla 6 presenta los datos de correlación para las 4 pruebas realizadas en el primer sector del laboratorio:

Tabla 6: Resultados de correlación primer sector del laboratorio.								
Algoritmo utilizado	Prueba 1		Prueba 2		Prueba 3		Prueba 4	
	M1	M2	M1	M2	M1	M2	M1	M2
DG	0,9839	0,9795	0,9803	0,9823	0,9794	0,9893	0,9441	0,9492
DJC	0,9877	0,9834	0,9776	0,9826	0,9894	0,9759	0,9454	0,9762
NDJC	0,9842	0,9812	0,9756	0,9826	0,9871	0,9774	0,9547	0,9826
FUJII	0,9731	0,9731	0,9782	0,9816	0,9773	0,9871	0,9502	0,949
LSI	0,3184	0,2644	0,5211	0,6975	0,1415	0,3888	0,5939	0,567

5.3 Resultados obtenidos para segundo sector del laboratorio.

Se realizará el mismo proceso para el segundo sector del laboratorio, en la figura 59 se ve el sector donde se trabajó. Las variaciones de peso y tiempo de cambio para la primera prueba se pueden ver en la tabla 7.



Fig 59. Sector del laboratorio donde se realizó el segundo ensayo gravimétrico.

Tabla 7: Variación de peso en la muestra. Prueba 1.

Tiempo (HH:MM:SS)	Peso (g)
0:00:00	0,0700
0:01:20	0,0650
0:03:15	0,0600
0:04:55	0,0550
0:12:25	0,0500
0:18:15	0,0450
0:33:15	0,0400

El peso inicial fue de 70 [mg], sin embargo, presentó diferentes tiempos en las variaciones de peso en comparación al primer sector, estas variaciones pueden ocurrir dado a que la temperatura ambiente puede afectar en el secado de pintura. El tiempo de estudio fue de 40 minutos nuevamente.

5.3.1 Promedio de actividad en la muestra.

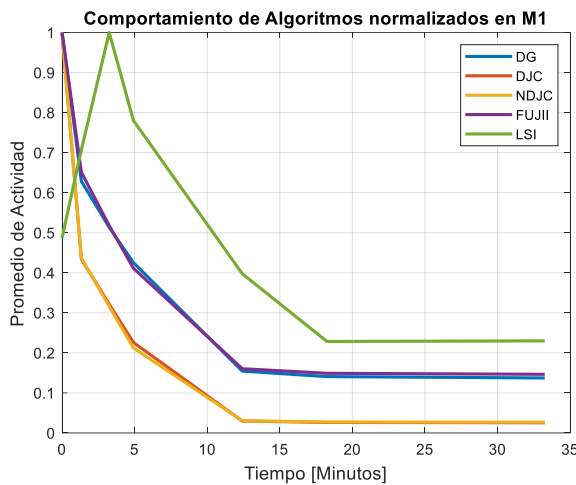
De igual manera que en el primer sector del laboratorio se determinan los promedios de actividad mediante las matrices de actividad entregados por los algoritmos de procesamiento (Ver Anexo B para visualizar los perfiles de actividad para el segundo sector), estos resultados se pueden observar en las tablas 8 y 9 y mediante la figura 60 se puede ver el comportamiento en función del tiempo de estas variables al ser normalizadas. Revisar Anexo C para visualizar los resultados de las cuatro pruebas realizadas en el segundo sector.

**Tabla 8: Promedio de actividad para segundo sector del laboratorio.
Prueba 1 (M1).**

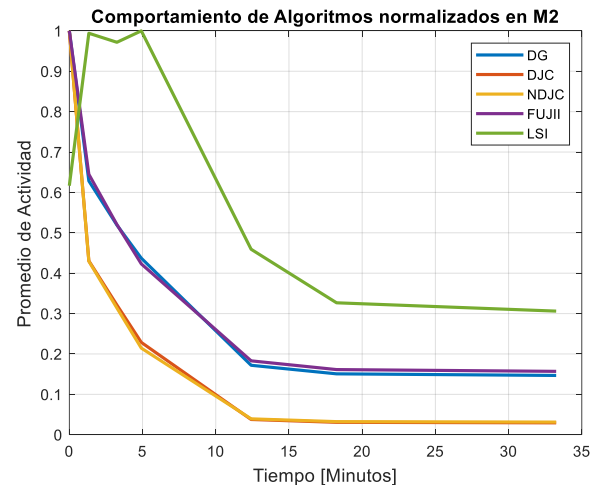
Tiempo (HH:MM:SS)	Pesos (g)	DG	DJC	NDJC	FUJII	LSI
0:00:00	0,0700	1.706,23	258,19	32,05	37,38	0,25
0:01:20	0,0650	1.072,19	112,01	14,00	24,33	0,36
0:03:15	0,0600	876,14	83,01	10,13	19,35	0,51
0:04:55	0,0550	725,77	58,34	6,80	15,38	0,40
0:12:25	0,0500	263,53	7,70	0,98	6,00	0,20
0:18:15	0,0450	240,13	6,79	0,88	5,57	0,12
0:33:15	0,0400	234,25	6,57	0,85	5,48	0,12

**Tabla 9: Promedio de actividad para segundo sector del laboratorio.
Prueba 1 (M2).**

Tiempo (HH:MM:SS)	Pesos (g)	DG	DJC	NDJC	FUJII	LSI
0:00:00	0,0700	1.554,46	235,48	30,95	37,34	0,25
0:01:20	0,0650	976,78	101,39	13,30	24,08	0,40
0:03:15	0,0600	807,08	75,64	9,71	19,43	0,39
0:04:55	0,0550	679,44	53,84	6,64	15,80	0,40
0:12:25	0,0500	267,34	8,90	1,22	6,83	0,18
0:18:15	0,0450	234,40	7,24	1,01	6,03	0,13
0:33:15	0,0400	228,23	6,94	0,97	5,86	0,12



(a)



(b)

Fig 60. Comportamiento de promedio de actividad en la muestra para área de trabajo M1 (a) y M2 (b).

A partir de las figura 60 se aprecia el mismo comportamiento que en el primer sector del laboratorio, donde el promedio de actividad de la muestra disminuye a medida que el peso de esta disminuye.

5.3.2 Correlación entre peso y actividad microscópica.

Finalmente se realiza la correlación entre peso y el promedio de actividad en la muestra con los gráficos de dispersión desde Excel. Obteniendo la tabla 10 con los distintos índices R^2 obtenidos en las cuatro pruebas realizadas para el segundo sector.

Tabla 10: Resultados de correlación segundo sector del laboratorio.

Algoritmo utilizado	Prueba 1		Prueba 2		Prueba 3		Prueba 4	
	M1	M2	M1	M2	M1	M2	M1	M2
DG	0,9712	0,9701	0,902	0,882	0,9035	0,8989	0,9669	0,9664
DJC	0,9711	0,9778	0,9724	0,9661	0,9756	0,9673	0,9744	0,9742
NDJC	0,9719	0,978	0,9702	0,9589	0,9714	0,9612	0,9789	0,9776
FUJII	0,9679	0,9642	0,8888	0,8683	0,8934	0,8823	0,9752	0,9752
LSI	0,4334	0,4399	0,5199	0,5093	0,8585	0,8376	0,2561	0,3394

5.4 Discusión de resultados.

A partir de los resultados mediante correlación obtenidos en las tablas 7 y 9 se procede a determinar un promedio y desviación estándar entre los índices obtenidos en las diferentes pruebas, obtenido las tablas 11 y 12 para el primer y segundo sector del laboratorio respectivamente.

Tabla 11: Promedio de correlación obtenido para primer sector del laboratorio.

Algoritmo utilizado	M1		M2	
	Promedio para M1	Desviación estándar	Promedio para M2	Desviación estándar
DG	0,9719	0,0187	0,9751	0,0177
DJC	0,9750	0,0204	0,9795	0,0040
NDJC	0,9754	0,0146	0,9810	0,0025
FUJII	0,9697	0,0132	0,9727	0,0168
LSI	0,3937	0,2046	0,4794	0,1912

Tabla 12: Promedio de correlación obtenido para segundo sector del laboratorio.

Algoritmo utilizado	M1		M2	
	Promedio para M1	Desviación estándar	Promedio para M2	Desviación estándar
DG	0,9359	0,0383	0,9294	0,0455
DJC	0,9734	0,0020	0,9714	0,0056
NDJC	0,9731	0,0039	0,9689	0,0103
FUJII	0,9313	0,0466	0,9225	0,0550
LSI	0,5170	0,2528	0,5316	0,2156

Con los resultados obtenidos en las tablas, se puede determinar que el sistema óptico portable desarrollado logra presentar una correlación de un 97% aproximadamente al utilizar algoritmos como DJC y NDJC para ambos sectores del laboratorio, sin importar que área de trabajo se utilice para determinar el promedio de actividad de la muestra.

Dentro de las pruebas al estudiar el algoritmo LSI, se aprecia que no se comportó de la manera deseada, presentando una baja correlación entre los datos, por lo que no se recomienda utilizar a no ser que se identifique el problema.

Dado a que se presentan índices de correlación similares en ambos sectores del laboratorio se determina que el sistema óptico es portable, obteniendo mejores resultados mediante el uso de algoritmos de procesamiento de imágenes como DJC y NDJC.

Capítulo 6. Conclusiones

6.1 Conclusiones

A partir de lo desarrollado en esta tesis se ha demostrado que el sistema óptico desarrollado ha sido capaz de generar y capturar un patrón de speckle, el cual puede ser analizado con distintos algoritmos de procesamiento de imágenes.

Durante la primera prueba de caracterización, se determinó que es óptimo que la cámara trabaje a un ángulo de 90° respecto a la horizontal para preservar la forma gaussiana del haz de luz generado por la fibra óptica.

Durante las segunda prueba de caracterización se evaluó la iluminación obtenida mediante el uso de fibra óptica para la transmisión de luz láser en dos lugares distintos del laboratorio se determinó que esta permite la expansión del haz de luz de manera gaussiana y sus valores de intensidad fueron similares durante estas pruebas. Mediante estas dos pruebas de caracterización se verifica que es viable utilizar fibra óptica como medio de transmisión de luz láser para generar una iluminación gaussiana con el sistema óptico desarrollado.

Luego se compararon los algoritmos de procesamiento de imágenes sobre muestras variables en el tiempo mediante el uso de una métrica de precisión, donde se determinó que los algoritmos DJC y NDJC alcanzaron una alta precisión en la detección de movilidad, con valores de 0.97 y 0.96 respectivamente utilizando 400 capturas. Por otro lado, el peor rendimiento fue mostrado por el algoritmo LSI, con un valor máximo de 0.73 utilizando 900 capturas.

A través del estudio gravimétrico realizado, se observó que el sistema óptico portable logró obtener una correlación del 97% en diferentes sectores evaluados mediante los algoritmos de procesamiento de imágenes DJC y NDJC, independientemente de las áreas de trabajo utilizadas para determinar el promedio de actividad en la muestra.

De esto se puede concluir que se cumplieron los objetivos propuestos, donde el sistema óptico desarrollado es portable, ya que se obtienen resultados coherentes entre sí en diferentes sectores del laboratorio, obteniendo mejores resultados con los algoritmos de procesamiento de imágenes DJC y NDJC.

6.2 Trabajo Futuro

Dentro de lo desarrollado en esta tesis se puede apreciar que el sistema óptico es portable y entrega resultados coherentes al utilizar algoritmos como DJC y NDJC.

Como trabajo futuro se pueden proponer distintas mejoras para este sistema, entre estas mejoras se podría corroborar el uso de otros algoritmos no vistos en esta tesis y/o estudiar el mal comportamiento de los algoritmos normalizados presentes en el trabajo para mejorar y ampliar las capacidades del sistema.

También se podría mejorar el diseño de la fuente de luz utilizada tanto en infraestructura, ya que esta se encuentra muy expuesta, como alimentación, ya que depende de una fuente variable siendo un elemento grande que podría perjudicar la portabilidad, esto se podría mejorar mediante el uso de baterías más duraderas, el uso de algún transformador o alimentación USB.

Como último punto se podría estudiar la factibilidad de realizar estudios de movimiento microscópico en tiempo real mediante el uso de FPGA.

Bibliografía

- [1] Del Mazo, A. (2019) *Microscopio simple: mucho más que una simple lupa*. Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias 16(2), 2401 doi:10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2019.v16.i2.2401
- [2] P. Davidovits and M. D. Egger, "Scanning Laser Microscope for Biological Investigations" Appl. Opt. 10, 1615-1619 (1971)
- [3] J. Cariñe, R. Guzmán, F.A. Torres-Ruiz, *Algorithm for dynamic Speckle pattern processing*, Optics and Lasers in Engineering, Volume 82, 2016, Pages 56-61, ISSN 0143-8166, <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2016.02.001>.
- [4] R. Pandiselvam, V.P. Mayookha, Anjineyulu Kothakota, S.V. Ramesh, Rohit Thirumdas, Praneeth Juvvi, *Biospeckle laser technique – A novel non-destructive approach for food quality and safety detection*, Trends in Food Science & Technology, Volume 97, 2020, Pages 1-13, ISSN 0924-2244, <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.12.028>.
- [5] Buijs, J., Gucht, J.v.d. & Sprakel, J. *Fourier transforms for fast and quantitative Laser Speckle Imaging*. Sci Rep 9, 13279 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-49570-7>
- [6] H. Chen, P. Miao, B. Bo, Y. Li and S. Tong, "A prototype system of portable laser speckle imager based on embedded graphics processing unit platform," 2019 41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), Berlin, Germany, 2019, pp. 3919-3922, doi: 10.1109/EMBC.2019.8857273.
- [7] Ott, M. (1996). *Capabilities and reliability of LEDs and laser diodes*. Internal NASA Parts and Packaging Publication.
- [8] Svelto, O., & Hanna, D. C. (2010). *Principles of lasers* (Vol. 1). New York: Springer.
- [9] Sirlin, E. (2005). *La Luz en el Teatro: Manual de Iluminación*. Buenos Aires, Inteatro
- [10] Saleh, B. E., & Teich, M. C. (2019). *Fundamentals of photonics*. John Wiley & sons.
- [11] de Moraes, D. A., & Czekanski, A. (2017, November). *Thermal modeling of 304L stainless steel for selective laser melting: Laser power input evaluation*. In ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (Vol. 58356, p. V002T02A033). American Society of Mechanical Engineers.
- [12] Aristizabal, V. H. (2007). *Introducción a la Tecnología de Fibras Ópticas y Análisis numérico de la propagación de la luz en fibras micro-estructuradas*. TecnoLógicas, (19), 141-165.
- [13] Bustamante, V. R. (2022). *Sensores CMOS y CCD*. Authorea Preprints.
- [14] Albert J.P. Theuwissen, *Solid-State Imaging Devices*, Editor(s): Robert A. Meyers, Encyclopedia of Physical Science and Technology (Third Edition), Academic Press, 2003, Pages 317-327, ISBN 9780122274107, <https://doi.org/10.1016/B0-12-227410-5/00709-2>.
- [15] González, E. G. (2007). *Guía básica de conceptos de óptica geométrica*. Departamento de Física aplicada III.
- [16] Zafra, D. (Agosto 2020). *¿Qué es la distancia focal?* Capture the Atlas. Recuperado el 13 de julio de 2023, de <https://capturetheatlas.com/es/que-es-la-distancia-focal/>
- [17] Gomez, C. (2018). *Interferencia, difracción y polarización de la luz*. Examen de Suficiencia Profesional (Tesis de grado). Universidad Nacional de Educación Enrique Guzmán y Valle, Lima, Perú.
- [18] E. Baradit, M. Avendaño, G. Cañas, M. Yañez, M. Trivi, J. Cariñe, *Characterization of topography hidden under paint by means of qualitative algorithms robust to the number of frames and non-uniform illumination*, Optics and Lasers in Engineering, Volume 158, 2022, 107158, ISSN 0143-8166, <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2022.107158>.
- [19] J. David Briers, Sian Webster, "Laser speckle contrast analysis (LASCA): a non-scanning, full-field technique for

- monitoring capillary blood flow*," J. Biomed. Opt. 1(2) (1 April 1996) <https://doi.org/10.1117/12.231359>
- [20] H. Cheng, Q. Luo, Z. Wang, H. Gong, S. Chen, W. Liang, and S. Zeng, "Efficient characterization of regional mesenteric blood flow by use of laser speckle imaging," Appl. Opt. 42, 5759-5764 (2003).
- [21] Baij, L., Buijs, J., Hermans, J.J. et al, "Quantifying solvent action in oil paint using portable laser speckle imaging," Sci Rep 10, 10574 (2020), <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67115-1>
- [22] BioLink Medical. (2022). RFLSI-III Laser Speckle Perfusion Imager. Recuperado el 12 de julio de 2023, de <https://www.biolink.cl/producto/rflsi-iii-laser-speckle-perfusion-imager/>
- [23] Valeria Di Tullio, Roberta Pigliapochi, Nicholas Zumbulyadis, Silvia A. Centeno, Jaclyn Catalano, Molly Wagner, Cecil Dybowski, *Dynamics of diffusion, evaporation, and retention of organic solvents in paints by unilateral NMR and HR-MAS NMR spectroscopy*, Microchemical Journal, Volume 190, 2023, 108582, ISSN 0026-265X, <https://doi.org/10.1016/j.microc.2023.108582>.
- [24] Lorenzo Consolini, Suresh K. Aggarwal, Sohail Murad, *A molecular dynamics simulation of droplet evaporation*, International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 46, Issue 17, 2003, Pages 3179-3188, ISSN 0017-9310, [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(03\)00101-7](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(03)00101-7).
- [25] Foto Igual. (Noviembre 2017). Curso Fundamentos Ópticos en Fotografía. Recuperado el 13 de julio de 2023, de <https://fotoigual.com/4-ecuacion-la-lente/>
- [26] Abramowitz, M. (2003). *Microscope Basics and Beyond*. New York, Olympus America Inc.
- [27] Faúndez, L. "Estrategias de control en fase sobre interferómetro óptico para conmutar sistemas de alta velocidad", Habilitación Profesional, Ingeniero Civil Eléctrico, 2022. Universidad Católica de la Santísima Concepción.
- [28] Carlos Enrique Carrillo. (Junio 2021). La influencia de los materiales en el diseño de iluminación. Recuperado el 22 de agosto de 2023, de <https://todo-lux.com/investigacion-y-desarrollo/disenio-iluminacion-influencia-materiales/>
- [29] Song, J., Yang, J., Liu, F., & Lu, K. (2020). *Quality assessment of laser speckle patterns for digital image correlation by a Multi-Factor Fusion Index*. Optics and Lasers in Engineering, 124, 105822. doi:10.1016/j.optlaseng.2019.105822
- [30] Daffara, C., & Marini, E. (2020). *A Portable Compact System for Laser Speckle Correlation Imaging of Artworks Using Projected Speckle Pattern*. Journal of Imaging, 6(11), 119. doi:10.3390/jimaging6110119

Anexo A

Resultados de precisión en detección de movilidad para algoritmos de procesamiento de imágenes en distintos sectores.

Tabla A1: Valores de precisión en detección de movilidad para sector 1.

N (Cantidad de capturas)	Algoritmo utilizado				
	DG	DJC	NDJC	LSI	FUJII
50	0,8208	0,9115	0,8780	0,5217	0,7268
100	0,8217	0,9127	0,8800	0,5402	0,7284
150	0,8205	0,9212	0,8794	0,5546	0,7272
200	0,8216	0,9133	0,8812	0,5678	0,7286
250	0,8243	0,9161	0,8848	0,5774	0,7322
300	0,8259	0,9178	0,8870	0,5840	0,7342
350	0,8277	0,9195	0,8893	0,5918	0,7365
400	0,8293	0,9211	0,8914	0,5996	0,7386
450	0,8309	0,9227	0,8935	0,6068	0,7407
500	0,8321	0,9239	0,8951	0,6136	0,7423
550	0,8328	0,9246	0,8961	0,6191	0,7432
600	0,8334	0,9253	0,8970	0,6226	0,7440
650	0,8344	0,9263	0,8983	0,6254	0,7453
700	0,8356	0,9274	0,8998	0,6287	0,7469
750	0,8367	0,9284	0,9012	0,6309	0,7484
800	0,8377	0,9294	0,9025	0,6344	0,7497
850	0,8386	0,9302	0,9036	0,6366	0,7509
900	0,8396	0,9312	0,9049	0,6384	0,7524
950	0,8406	0,9320	0,9060	0,6401	0,7536
1000	0,8415	0,9328	0,9071	0,6425	0,7549

Tabla A2: Valores de precisión en detección de movilidad para sector 2.

N (Cantidad de capturas)	Algoritmo				
	DG	DJC	NDJC	LSI	FUJII
50	0,8873	0,9680	0,9619	0,5614	0,8084
100	0,8921	0,9708	0,9652	0,6073	0,8158
150	0,8949	0,9723	0,9670	0,6420	0,8202
200	0,8960	0,9729	0,9677	0,6637	0,8219
250	0,8969	0,9734	0,9684	0,6850	0,8235
300	0,8974	0,9738	0,9688	0,6957	0,8246
350	0,8982	0,9742	0,9693	0,7003	0,8259
400	0,8984	0,9744	0,9696	0,7094	0,8265
450	0,8977	0,9741	0,9693	0,7139	0,8256
500	0,8975	0,9741	0,9692	0,7162	0,8254
550	0,8975	0,9741	0,9693	0,7155	0,8255
600	0,8968	0,9738	0,9690	0,7141	0,8245
650	0,8954	0,9732	0,9682	0,7074	0,8225
700	0,8932	0,9722	0,9671	0,7090	0,8193
750	0,8908	0,9713	0,9660	0,7151	0,8157
800	0,8884	0,9702	0,9648	0,7209	0,8122
850	0,8857	0,9691	0,9635	0,7290	0,8082
900	0,8832	0,9680	0,9622	0,7312	0,8046
950	0,8816	0,9673	0,9614	0,7284	0,8023
1000	0,8791	0,9662	0,9601	0,7276	0,7987

Anexo B

Perfiles de actividad para los algoritmos de procesamiento en la primera prueba de cada sector.
Para el primer sector los algoritmos restantes fueron:

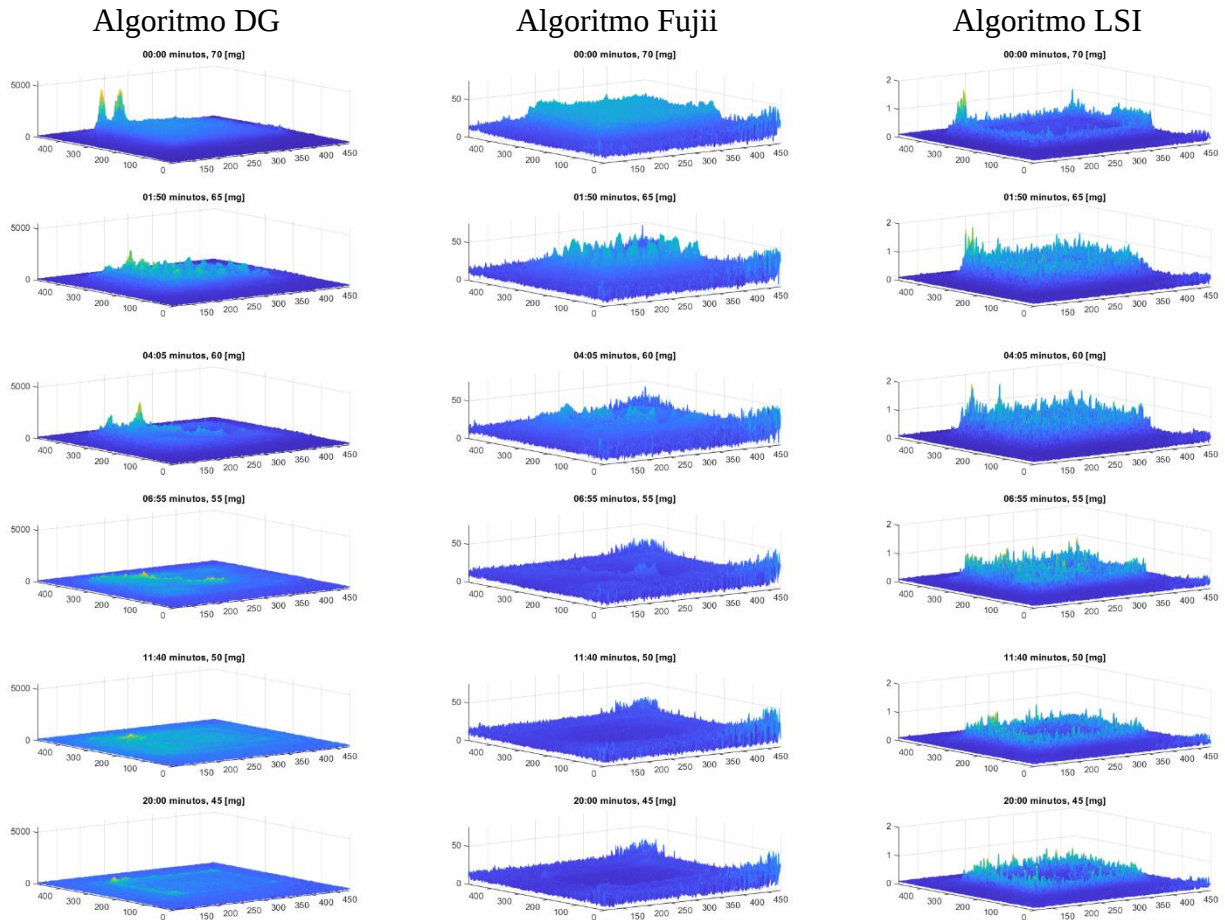


Fig.B1: Comportamiento de perfil de actividad obtenido mediante diferentes algoritmos.

Para el segundo sector del laboratorio se presentaron los siguientes perfiles de actividad.

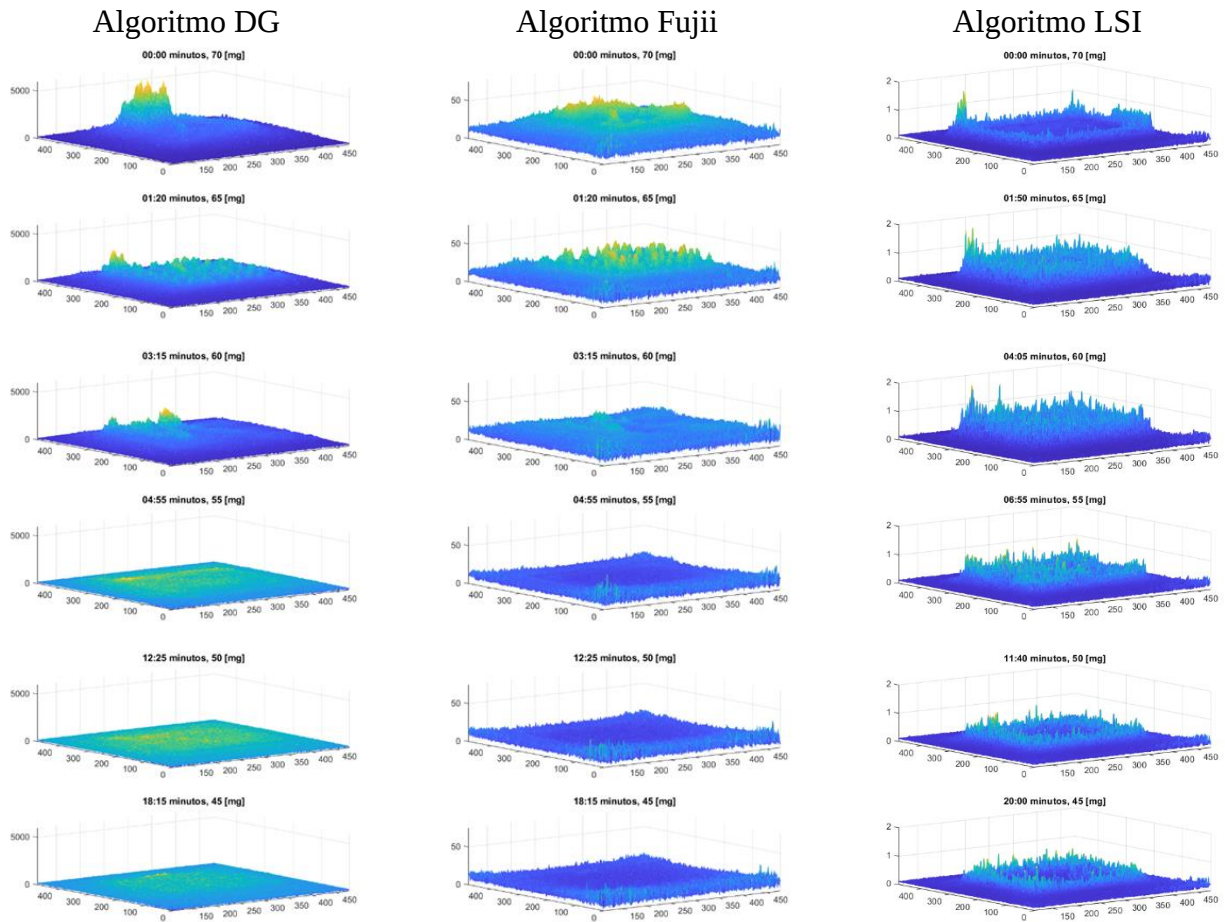
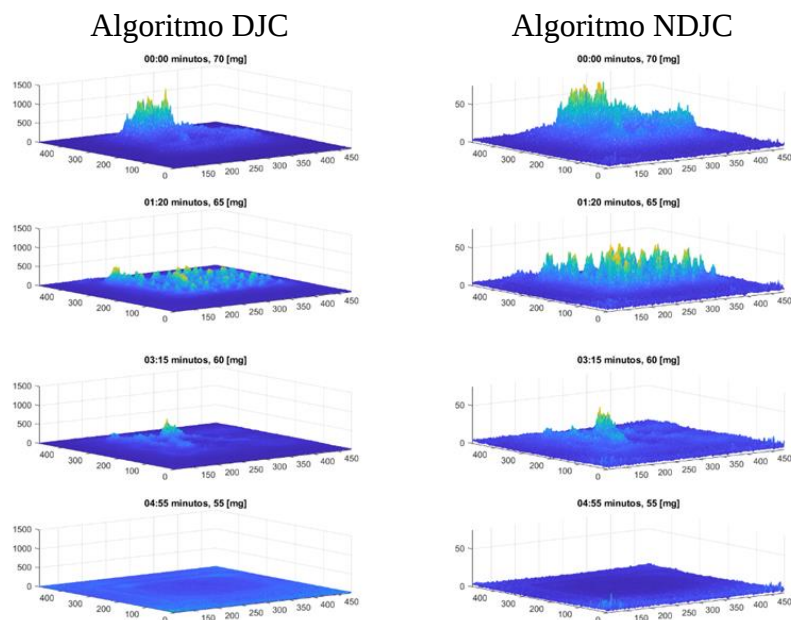


Fig.B2: Comportamiento de perfil de actividad obtenido mediante diferentes algoritmos.



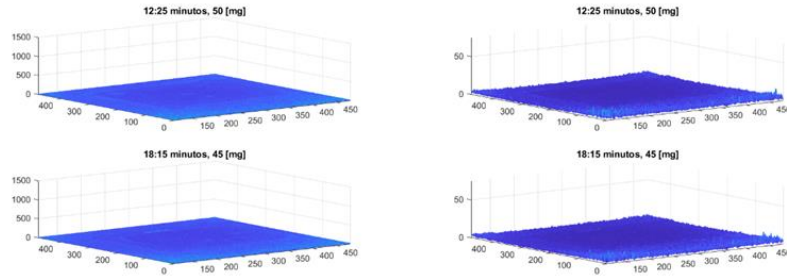


Fig.B3: Comportamiento de perfil de actividad obtenido mediante diferentes algoritmos

Anexo C

Los promedios de actividad obtenidos para las pruebas en el primer sector fueron los siguientes:

Tabla C1: Sector 1 Prueba 2 (M1).

Tiempo	Pesos	DG	DJC	NDJC	FUJII	LSI
00:00	0,075	2.136,87	368,17	43,04	42,35	0,32
01:00	0,070	1.309,65	149,25	17,55	26,87	0,40
02:50	0,065	1.086,74	122,42	14,73	22,98	0,46
05:35	0,060	494,98	28,74	3,50	10,73	0,30
09:30	0,055	333,20	11,11	1,34	7,20	0,25
17:30	0,050	266,52	7,38	0,90	5,70	0,14
32:30	0,045	238,61	6,19	0,76	5,11	0,11

Tabla C2: Sector 1 Prueba 2 (M2).

Tiempo	Pesos	DG	DJC	NDJC	FUJII	LSI
00:00	0,075	1.788,67	305,50	38,91	40,94	0,37
01:00	0,070	1.147,92	137,86	17,87	27,36	0,45
02:50	0,065	840,02	103,77	13,41	20,22	0,40
05:35	0,060	418,16	22,59	2,96	10,38	0,31
09:30	0,055	321,31	12,36	1,67	8,21	0,29
17:30	0,050	286,75	10,60	1,49	7,51	0,24
32:30	0,045	228,98	6,90	0,96	5,83	0,13

Tabla C3: Sector 1 Prueba 3 (M1).

Tiempo	Pesos	DG	DJC	NDJC	FUJII	LSI
00:00	0,065	1.913,18	307,26	36,71	39,34	0,27
01:10	0,060	1.219,39	135,25	16,21	25,95	0,40
03:20	0,055	1.017,09	47,29	5,58	21,57	0,89
06:00	0,050	484,33	22,52	2,66	10,27	0,43
10:10	0,045	287,82	8,70	1,07	6,38	0,17
19:40	0,040	244,14	6,73	0,85	5,48	0,12
38:10	0,035	231,32	6,42	0,84	5,38	0,10

Tabla C4: Sector 1 Prueba 3 (M2).

Tiempo	Pesos	DG	DJC	NDJC	FUJII	LSI
00:00	0,065	1.628,16	260,41	33,90	38,66	0,29
01:10	0,060	1.110,95	135,51	17,72	27,22	0,45
03:20	0,055	844,32	102,99	13,47	20,69	0,34
06:00	0,050	462,87	24,99	3,32	11,58	0,44
10:10	0,045	289,93	10,54	1,47	7,63	0,25
19:40	0,040	233,65	7,51	1,08	6,26	0,14
38:10	0,035	222,63	7,22	1,07	6,17	0,13

Tabla C5: Sector 1 Prueba 4 (M1).

Tiempo	Pesos	DG	DJC	NDJC	FUJII	LSI
00:00	0,075	1.504,29	208,33	25,56	32,74	0,40
01:30	0,070	1.195,88	121,54	14,31	25,36	0,63
03:30	0,065	956,71	97,23	11,45	20,29	0,50
06:40	0,060	350,74	12,61	1,52	7,63	0,27
11:20	0,055	288,37	8,73	1,08	6,39	0,17
20:30	0,050	246,41	6,79	0,86	5,51	0,11
36:35	0,045	232,88	6,34	0,82	5,30	0,10

Tabla C6: Sector 1 Prueba 4 (M2).

Tiempo	Pesos	DG	DJC	NDJC	FUJII	LSI
00:00	0,075	1.367,57	202,58	27,51	34,65	0,43
01:30	0,070	1.159,50	119,19	15,25	29,83	0,76
03:30	0,065	815,32	79,46	10,16	19,89	0,51
06:40	0,060	344,11	14,68	2,00	8,88	0,30
11:20	0,055	281,41	10,06	1,41	7,46	0,24
20:30	0,050	266,02	9,60	1,38	7,14	0,21
36:35	0,045	224,90	7,04	1,01	5,98	0,12

Los promedios de actividad para las otras pruebas del segundo sector del laboratorio fueron los siguientes:

Tabla C7: Sector 2 Prueba 2 (M1).

Tiempo	Pesos	DG	DJC	NDJC	FUJII	LSI
0:00:00	0,065	1.704,21	123,43	15,46	39,68	0,32
0:02:10	0,060	681,68	49,37	6,18	15,87	0,36
0:04:15	0,055	561,70	38,32	4,56	12,42	0,33
0:09:10	0,050	364,56	13,97	1,77	8,50	0,25
0:19:05	0,045	240,27	7,22	0,97	5,93	0,13
0:38:45	0,040	234,61	7,09	0,99	5,85	0,09

Tabla C8: Sector 2 Prueba 2 (M2).

Tiempo	Pesos	DG	DJC	NDJC	FUJII	LSI
0:00:00	0,065	1.548,26	111,42	14,68	39,37	0,33
0:02:10	0,060	619,30	44,57	5,87	15,75	0,38
0:04:15	0,055	473,45	29,14	3,75	11,82	0,33
0:09:10	0,050	342,62	13,99	1,92	8,94	0,29
0:19:05	0,045	240,10	7,92	1,14	6,50	0,16
0:38:45	0,040	233,23	7,60	1,11	6,29	0,11

Tabla C9: Sector 2 Prueba 3 (M1).

Tiempo	Pesos	DG	DJC	NDJC	FUJII	LSI
0:00:00	0,080	1.749,31	154,32	18,65	38,79	0,35
0:02:05	0,075	874,66	77,16	9,33	19,39	0,38
0:04:10	0,070	560,05	33,16	3,87	11,86	0,32
0:07:25	0,065	316,17	9,83	1,17	6,65	0,22
0:11:50	0,060	286,17	8,21	0,98	6,05	0,17
0:17:00	0,055	278,56	8,47	1,07	6,22	0,12
0:33:40	0,050	236,75	6,54	0,83	5,41	0,12

Tabla C10: Sector 2 Prueba 3 (M2).

Tiempo	Pesos	DG	DJC	NDJC	FUJII	LSI
0:00:00	0,080	1.867,54	190,37	22,38	42,05	0,36
0:02:05	0,075	933,77	95,19	11,19	21,02	0,44
0:04:10	0,070	507,16	29,02	3,57	11,62	0,32
0:07:25	0,065	304,15	10,39	1,34	7,22	0,22
0:11:50	0,060	277,47	8,81	1,15	6,62	0,18
0:17:00	0,055	270,62	9,03	1,22	6,76	0,16
0:33:40	0,050	230,06	6,88	0,94	5,78	0,12

Tabla C11: Sector 2 Prueba 4 (M1).

Tiempo	Pesos	DG	DJC	NDJC	FUJII	LSI
0:00:00	0,0800	1.647,68	295,67	42,09	44,06	0,32
0:01:40	0,0750	1.336,29	212,02	30,15	36,48	0,52
0:03:55	0,0700	800,37	84,41	12,23	22,98	0,59
0:06:50	0,0650	564,32	44,27	6,12	15,34	0,48
0:10:50	0,0600	257,85	9,26	1,33	7,18	0,19
0:16:10	0,0550	232,01	7,84	1,14	6,55	0,15
0:24:10	0,0500	239,01	7,96	1,14	6,54	0,15
0:33:10	0,0450	217,30	7,49	1,16	6,48	0,11

Tabla C12: Sector 2 Prueba 4 (M2).

Tiempo	Pesos	DG	DJC	NDJC	FUJII	LSI
0:00:00	0,0800	1.540,14	277,94	41,45	44,34	0,32
0:01:40	0,0750	1.221,34	191,82	28,48	35,87	0,56
0:03:55	0,0700	747,50	78,31	11,77	22,76	0,60
0:06:50	0,0650	489,20	35,66	5,09	14,15	0,46
0:10:50	0,0600	250,83	9,52	1,43	7,54	0,21
0:16:10	0,0550	229,40	8,33	1,28	7,00	0,17
0:24:10	0,0500	238,18	8,73	1,33	7,19	0,19
0:33:10	0,0450	212,66	7,97	1,31	6,96	0,14