



Institución Universitaria

**DETECCIÓN DE CAMBIO DE ESPESOR EN
CONTENEDORES DE VIDRIO
TRANSPARENTE POR MEDIO DE “TIME OF
FLIGHT DISTORTION” A PARTIR DE DATOS
RGBD**

Hader Norvey Gómez Gómez

Instituto Tecnológico Metropolitano

Facultad de Ingenierías

Medellín, Colombia

2021

DETECCIÓN DE CAMBIO DE ESPESOR EN CONTENEDORES DE VIDRIO TRANSPARENTE POR MEDIO DE “TIME OF FLIGHT DISTORTION” A PARTIR DE DATOS RGBD

Hader Norvey Gómez Gómez

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Automatización y Control

Director 1

MSc. Mauricio Arias Correa

Director 2

PhD. Carlos A. Madrigal

Instituto Tecnológico Metropolitano

Facultad de Ingenierías

Medellín, Colombia

2021

Dedicatoria

A mi madre Luz Estella Gómez, luchadora incansable y ejemplo de vida y a mis hijos con amor incondicional.

*"VIVE COMO SI FUERAS A MORIR MAÑANA.
APRENDE COMO SI FUERAS A VIVIR POR
SIEMPRE"*

Gandhi

Resumen

Las cámaras de profundidad que operan mediante técnicas “*Time of Flight*” (en adelante TOF) como el Kinect V2 de Microsoft, cuentan en la actualidad con altas prestaciones en velocidad y resolución, brindando nuevas alternativas de trabajo con mapas de profundidad y reconstrucciones 3D en diferentes áreas de investigación. A nivel industrial las cámaras de profundidad se utilizan también en procesos de control de calidad, ya que por las características físicas y geométricas de algunos defectos se requiere de otra dimensión para su identificación, éste es el caso de la medición del espesor en la superficie de los contenedores de vidrio curvo transparente o en la superficie de los vidrios planos. En el sector productivo tradicionalmente se ha abordado el problema del cálculo de espesor en contenedores y superficies de vidrio, mediante el uso de un haz de luz láser principalmente con técnicas de interferometría, las cuales cuentan con una alta resolución en la medición, aunque su principal falencia es que sólo permiten medir el espesor en un solo punto de la superficie del vidrio a la vez; adicionalmente para realizar esta medición se requiere de equipos especializados que son demasiado costosos para ser adquiridos por la mediana y pequeña industria. En este trabajo de tesis de maestría se proponen dos metodologías con diferentes resoluciones para la detección del cambio de espesor sobre una superficie completa de un vidrio plano, o en una de las paredes de un contenedor de vidrio transparente con forma curva, esto se logra mediante el análisis de imágenes RGBD adquiridas con la técnica TOF. Esta propuesta está basada en el comportamiento físico del haz de luz, que al pasar de un medio como el aire a otro de mayor densidad como el vidrio, cambia la dirección y velocidad (refracción); de la misma manera el valor de profundidad de una superficie opaca del fondo de una escena que nos servirá como referencia, y que llamaremos *background*, el cual es conocido y medido con una cámara 3D que opera con técnica TOF, sufrirá un cambio en el valor de profundidad al anteponer en la escena un vidrio transparente, esta variación es causada por el incremento del tiempo del haz de luz al refractarse en el vidrio, reflejarse en el *background*, pasar de nuevo por el vidrio hasta llegar finalmente al sensor de la cámara de profundidad. El cambio en la medición inicial de la imagen RGBD del background tiene una correlación directa con el espesor del vidrio interpuesto en la escena. Con la metodología propuesta fue posible conocer la variación del espesor en milímetros en la superficie de los

vidrios planos y en las caras de los contenedores de vidrio curvo transparentes, por medio de imágenes RGBD adquiridas con el sensor Kinect V2; los modelos se desarrollaron utilizando múltiples ecuaciones lineales aplicadas a subregiones de 3 x 3 píxeles en la superficie completa de los vidrios planos y también a una de las caras de un contenedor curvo de vidrio transparente.

Palabras clave: Kinect V2, Depth sensor, Time-of-flight, Glass thickness

Abstract

Depth cameras that operate using “Time of Flight” techniques (hereinafter TOF), such as Microsoft's Kinect V2, currently have high performance in speed and resolution, providing new alternatives for working with depth maps and 3D reconstructions in different research areas. Industrially, depth cameras are also used in quality control processes on account of the physical and geometric features of some defects that require another dimension for identification, this is the case of measuring the thickness on the surface of clear curved glass containers or flat glass surfaces. In the productive sector, the problem of calculating thickness in containers and glass surfaces has traditionally been tackled, by using a laser light beam mainly with interferometry techniques, which have a high resolution in the measurement, although its biggest flaw is the fact that it only allows the thickness to be measured at a single point on the glass surface at a time; additionally, to carry out this measurement, expensive specialized equipment is required, which is hard to be acquired by small and medium-sized industries. In this master's thesis work, two methodologies with different resolutions are proposed for the detection of change in thickness on a complete surface of a flat glass, or on one of the walls of a transparent glass container with a curved shape, this is achieved by the analysis of RGBD images acquired with the TOF technique. This proposal is based on the physical behavior of the light beam, which when passing from a medium such as air to a higher density medium such as glass, changes the direction and speed (refraction); in the same way, the depth value of an opaque surface in the background of a scene that will serve as a reference and that we will call background, which is known and measured with a 3D camera that operates with the TOF technique, will undergo a change in the depth value when a transparent glass is placed before the scene, this variation is caused by the increase in the time of the light beam as it refracts in the glass, reflects in the background, passes through the glass again until finally reaching the depth camera sensor. The change in the initial measurement of the RGBD image of the background has a direct correlation with the thickness of the glass interposed in the scene. With the proposed methodology it was possible to know the thickness variation in millimeters on the surface of the flat glass and on the faces of the transparent curved glass containers, through RGBD images acquired with the Kinect V2 sensor; the models were developed using multiple linear equations applied to 3 x 3 pixel

subregions on the entire surface of the flat glass and also to one of the faces of a curved clear glass container.

Keywords: Kinect v2, Depth sensor, Time-of-flight, Glass thickness.

Lista de Figuras

FIGURA: 2-1 CAMBIO DE VELOCIDAD DE LA LUZ, EN UNA DISTANCIA X, CUANDO PASA DE UN MEDIO A OTRO CON DENSIDAD DIFERENTES, FUENTE [4]	4
FIGURA: 2-2 REFLEXIÓN ESPECULAR DE LA LUZ DONDE EL ÁNGULO DEL RAYO REFLEJADO ES IGUAL AL ÁNGULO DEL RAYO INCIDENTE, FUENTE [4]	5
FIGURA: 2-3 REFLEXIÓN DIFUSA DE LA LUZ, DONDE LOS RAYOS REFLEJADOS SE DISTRIBUYEN EN TODAS LAS DIRECCIONES, FUENTE [6].....	6
FIGURA: 2-4 REFRACCIÓN DE LA LUZ, CUANDO PASA DE UN MEDIO A OTRO CON MAYOR ÍNDICE DE REFRACCIÓN, FUENTE [4]	7
FIGURA: 2-5 REFRACCIÓN DE LA LUZ, CUANDO PASA DE UN MEDIO A OTRO CON MENOR ÍNDICE DE REFRACCIÓN, FUENTE [4]	7
FIGURA: 2-6 DISPERSIÓN DE LA LUZ A TRAVÉS DE UN PRISMA DE VIDRIO, FUENTE WIKIPEDIA	8
FIGURA: 2-7 CLASIFICACIÓN DE TÉCNICAS ACTIVAS PARA LA ADQUISICIÓN DE IMÁGENES DE PROFUNDIDAD	9
FIGURA: 2-8 MEDICIÓN DE PROFUNDIDAD DE UN OBJETO, POR MEDIO DE “TOF” DIRECTO ..	11
FIGURA: 2-9 MEDICIÓN DE PROFUNDIDAD DE UN OBJETO, POR MEDIO DE “TOF” INDIRECTO, FUENTE [10]	12
FIGURA: 2-10 MÉTODO MEDIANTE CARGA DE CONDENSADORES PARA CONOCER EL DESFASE ENTRE LA SEÑAL DE LUZ EMITIDA Y LA REFLEJADA CON (I-TOF), FUENTE [12]	12
FIGURA: 2-11 GENERACIÓN DE UNA IMAGEN DE PROFUNDIDAD POR MEDIO DE UNA CÁMARA CON (I-TOF), FUENTE [8].....	13
FIGURA: 2-12 CONFIGURACIÓN INTERNA DEL KINECT V2 DE MICROSOFT, FUENTE: [35]	14
FIGURA: 2-13 MEDICIÓN DEL ESPESOR DE UN VIDRIO PLANO TRANSPARENTE EN UNA LÍNEA DE PRODUCCIÓN, FUENTE [22]	16
FIGURA: 2-14 MEDICIÓN DEL ESPESOR EN UN VIDRIO, MEDIANTE LA CORRELACIÓN EXISTENTE CON LA POTENCIA DEL HAZ DE LUZ REFLEJADO, FUENTE [24]	17
FIGURA: 2-15 MEDICIÓN DEL ESPESOR Y DEL ÍNDICE DE REFRACCIÓN EN UN MATERIAL TRANSPARENTE, MEDIANTE UN <i>SELF-MIX INTERFEROMETER</i> , FUENTE [25].....	17
FIGURA: 2-16 MEDICIÓN DEL ESPESOR Y DEL ÍNDICE DE REFRACCIÓN EN UN LENTE REF BK7, MEDIANTE UN <i>FIZEAU INTERFEROMETER</i> [28]	18
FIGURA: 2-18 DIAGRAMA DEL MONTAJE FÍSICO, PARA MEDIR EL ESPESOR EN BOTELLAS DE VIDRIO TRANSPARENTE EN UNA LÍNEA DE PRODUCCIÓN, (HE, 2005).....	20
FIGURA: 2-17 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UN INTERFERÓMETRO PARA LA DETECCIÓN DEL ESPESOR EN BOTELLAS DE VIDRIO TRANSPARENTE, [30]	20

FIGURA: 4-1 METODOLOGÍA SIMPLE PROPUESTA PARA LA DETECCIÓN DEL CAMBIO DE ESPESOR EN LA SUPERFICIE DE VIDRIO TRANSPARENTE	43
FIGURA: 4-2 APLICACIÓN DE LA TÉCNICA “TOF” SIMPLE EN LA SUPERFICIE DE LA MATRIZ DE VIDRIOS PLANOS CON DIFERENTES ESPESORES	44
FIGURA: 4-3 IMÁGENES CON LOS VALORES DIGITALES RESULTANTE DESPUÉS DE LA DIFERENCIA CON EL BACKGROUND, TÉCNICA “TOF” SIMPLE	45
FIGURA: 4-4 PROMEDIO DE LOS VALORES DE PROFUNDIDAD AGRUPADOS POR ESPESORES PARA EL MODELO SIMPLE.....	46
FIGURA: 4-5 ORGANIZACIÓN POR ESPESORES Y DIVISIÓN EN SUBGRUPOS DE 3 X 3 PÍXELES, PARA EL MODELO SIMPLE.....	46
FIGURA: 4-6 VALOR DE PROFUNDIDAD DE LAS MUESTRAS DE VIDRIO PLANO TRANSPARENTE CON RESPECTO A LA POSICIÓN ESPACIAL DENTRO DEL BACKGROUND EN EL MODELO SIMPLE	47
FIGURA: 4-7 GRÁFICA RADIAL, CON LA DIFERENCIA DEL PIXEL CENTRAL “B2” VVN<S LAS DEMÁS POSICIONES ESPACIALES DENTRO DEL BACKGROUND, EN EL MODELO SIMPLE	47
FIGURA: 4-8 VALOR DE PROFUNDIDAD DE LAS MUESTRAS DE VIDRIO CON RESPECTO AL CAMBIO DE ESPESOR, EN LAS DIFERENTES POSICIONES ESPACIALES DEL MODELO SIMPLE	48
FIGURA: 4-9 COMPARACIÓN DE LOS TRES MODELOS LINEALES RESULTANTES DEL CAMBIO DE ESPESOR CON "TOF" SIMPLE.....	49
FIGURA: 4-10 REPRESENTACIÓN EN NUBES DE PUNTOS DE LA SUPERFICIE DE UNA PLACA DE VIDRIO CON UN ESPESOR DE 6 MM, ADQUIRIDA A UNA DISTANCIA DE 1100 MM, CON EL MODELO SIMPLE	50
FIGURA: 4-11 REPRESENTACIÓN EN NUBES DE PUNTOS DE LA SUPERFICIE DE UNA PLACA DE VIDRIO CON UN ESPESOR DE 6 MM, ADQUIRIDA A UNA DISTANCIA DE 1200 MM, CON EL MODELO SIMPLE	50
FIGURA: 4-12 REPRESENTACIÓN EN NUBES DE PUNTOS DE LA SUPERFICIE DE UNA PLACA DE VIDRIO CON UN ESPESOR DE 6 MM, ADQUIRIDA A UNA DISTANCIA DE 1300 MM, CON EL MODELO UNO	51
FIGURA: 4-13 APLICACIÓN DE LA TÉCNICA “TOF” SIMPLE EN CONTENEDOR CURVO TRANSPARENTE CON TAMAÑOS QUE VARÍAN EN GRADES MEDIANOS Y PEQUEÑOS.....	52
FIGURA: 4-14 METODOLOGÍA COMPUESTA PROPUESTA PARA LA DETECCIÓN DEL CAMBIO DE ESPESOR EN LA SUPERFICIE DE VIDRIO TRANSPARENTE.....	53
FIGURA: 4-15 APLICACIÓN DE LA TÉCNICA “TOFI” INDIRECTA EN LA SUPERFICIE DE LA MATRIZ DE VIDRIOS PLANOS CON DIFERENTES ESPESORES	54
FIGURA: 4-16 IMÁGENES CON LOS VALORES DIGITALES RESULTANTE DESPUÉS DE LA DIFERENCIA CON LAS MUESTRAS OPACAS, TÉCNICA “TOFI” INDIRECTA.....	55

FIGURA: 4-18 ORGANIZACIÓN POR ESPESORES Y DIVISIÓN EN SUBGRUPOS DE 3 X 3 PÍXELES, PARA EL MODELO COMPUESTO.....	56
FIGURA: 4-17 PROMEDIO DE LOS VALORES DE PROFUNDIDAD AGRUPADOS POR ESPESORES PARA EL MODELO COMPUESTO.....	56
FIGURA: 4-19 VALOR DE PROFUNDIDAD DE LAS MUESTRAS DE VIDRIO PLANO TRANSPARENTE CON RESPECTO A LA POSICIÓN ESPACIAL DENTRO DEL BACKGROUND EN EL MODELO COMPUESTO.....	57
FIGURA: 4-20 GRÁFICA RADIAL, CON LA DIFERENCIA DEL PIXEL CENTRAL “B2” VS LAS DEMÁS POSICIONES ESPACIALES DENTRO DEL BACKGROUND EN EL MODELO COMPUESTO.....	57
FIGURA: 4-21 VALOR DE PROFUNDIDAD DE LAS MUESTRAS DE VIDRIO CON RESPECTO AL CAMBIO DE ESPESOR, EN LAS DIFERENTES POSICIONES ESPACIALES DEL MODELO COMPUESTO.....	58
FIGURA: 4-22 COMPARACIÓN DE LOS TRES MODELOS LINEALES RESULTANTE DEL CAMBIO DE ESPESOR CON "TOF" COMPUESTO.....	59
FIGURA: 4-23 REPRESENTACIÓN EN NUBES DE PUNTOS DE LA SUPERFICIE DE UNA PLACA DE VIDRIO CON UN ESPESOR DE 6 MM, ADQUIRIDA A UNA DISTANCIA DE 1100 MM, CON EL MODELO COMPUESTO.....	60
FIGURA: 4-24 REPRESENTACIÓN EN NUBES DE PUNTOS DE LA SUPERFICIE DE UNA PLACA DE VIDRIO CON UN ESPESOR DE 6 MM, ADQUIRIDA A UNA DISTANCIA DE 1200 MM, CON EL MODELO COMPUESTO.....	60
FIGURA: 4-25 REPRESENTACIÓN EN NUBES DE PUNTOS DE LA SUPERFICIE DE UNA PLACA DE VIDRIO CON UN ESPESOR DE 6 MM, ADQUIRIDA A UNA DISTANCIA DE 1300 MM, CON EL MODELO COMPUESTO.....	60
FIGURA: 4-26 APLICACIÓN DE LA TÉCNICA “TOF” COMPUESTO EN CONTENEDOR CURVO TRANSPARENTE CON DIFERENTES TAMAÑOS.....	61

Lista de Tablas

TABLA 1 COMPARACIÓN DE TECNOLOGÍAS DEL KINECT V1 VS KINECT V2, FUENTE (RAHMAN, 2017).....	14
TABLA 2 CLASIFICACIÓN LOS PARÁMETROS VARIABLES Y CONTROLADOS DURANTE LAS EXPERIMENTACIONES.....	23
TABLA 3. DONDE SE RELACIONA LA RESOLUCIÓN Y LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR CON RESPECTO A LA DISTANCIA DE ADQUISICIÓN DE LA IMAGEN RGBD ADQUIRIDA A UN BACKGROUND OPACO.....	31
TABLA 4 CON LOS VALORES DE LAS DIFERENTES VARIABLES QUE INTERVIENEN EN MODELO SIMPLE, PARA LA DETECCIÓN DEL CAMBIO DE ESPESOR EN SUPERFICIES DE VIDRIO TRANSPARENTE.	53
TABLA 5, CON LOS VALORES DE LAS DIFERENTES VARIABLES QUE INTERVIENEN EN MODELO COMPUESTO, PARA LA DETECCIÓN DEL CAMBIO DE ESPESOR EN SUPERFICIES DE VIDRIO TRANSPARENTE.	62

Contenido

Resumen	5
1. Introducción	1
1.1 Síntesis del problema	2
1.2 Objetivo	2
1.2.1 Objetivo General.....	2
1.2.2 Objetivos Específicos	2
1.3 Productos de investigación	3
Exposición tipo poster	3
Exposición tipo oral	3
Exposición tipo oral (inglés).....	3
2. Marco teórico y estado del arte	4
2.1 Propiedades ópticas de la luz	4
2.2 Fenómenos asociados a la propagación de la luz.....	5
2.2.1 Reflexión	5
2.2.2 Reflexión especular	5
2.2.3 Reflexión Difusa.....	6
2.2.4 Refracción.....	6
2.2.5 Dispersión.....	7
2.2.6 Absorción	8
2.3 Técnicas activas para la adquisición de imágenes de profundidad.....	8
2.3.1 Luz estructurada	9
2.3.2 Interferometría	10
2.3.3 Time of Flight.....	10
2.3.4 Medición Directa "D-TOF"	10
1	11
2.3.5 Medición Indirecta "I-TOF"	11
2.4 Cámara Kinect	13
2.4.1 Características técnicas de la cámara Kinect V2	13
2.5 Estado del arte.....	15

3.	Adquisición de imágenes 3D en contenedores de vidrio transparente.....	22
3.1	Adquisición de las imágenes de profundidad	22
3.2	Parámetros controlados durante la adquisición.....	24
3.2.1	Alineación de la cámara con respecto a las muestras de vidrio.....	24
3.2.2	Resolución de la cámara de profundidad del Kinect V2	25
3.2.3	Variación por temperatura interna del Kinect V.2	26
3.2.4	Variación por ubicación espacial de las muestras	27
3.2.5	Variación por múltiples reflexiones de la luz.....	28
3.2.6	Variación por luz externa indirecta	29
3.2.7	Variación por la temperatura ambiente	29
3.3	Parámetros variables durante la adquisición de las imágenes	30
3.3.1	Variación por la distancia de adquisición de la imagen RGBD	30
3.3.2	Muestras de vidrio transparente planas y curvas	32
3.3.3	Variación por la ubicación espacial de la muestra	33
3.3.4	Preprocesamiento de las imágenes de profundidad.....	34
3.3.5	Adquisición simple de imágenes de profundidad en superficies de vidrio plano transparente	36
3.3.6	Adquisición simple de imágenes de profundidad en superficies de vidrio curvo transparente	37
3.4	Adquisición compuesta de imágenes de profundidad.....	38
3.4.1	Adquisición compuesta de imágenes de profundidad en superficies de vidrio plano transparente	39
3.4.2	Adquisición compuesta de imágenes de profundidad en superficies de vidrio curvo transparente	41
3.5	Análisis de resultados	42
4.	Modelos propuestos para la detección del cambio de espesor en contenedores de vidrio transparente.....	43
4.1	Metodología simple para la detección del cambio de espesor en la superficie del vidrio	43
4.1.1	Procedimiento para analizar las imágenes mediante “TOF” para el modelo simple	44
4.1.2	Cambio en el valor de profundidad variando la posición espacial de las muestras para el modelo simple	46

4.1.3	Cambio en el valor de profundidad variando el espesor de las muestras para el modelo simple	48
4.1.4	Validación de los Modelos lineales para diferentes distancias de adquisición 49	
4.1.5	Aplicación de la técnica “TOF” simple para contenedores de vidrio curvo transparente	51
4.1.6	Modelo simple propuesto para la detección de espesor en contenedores de vidrio transparente.....	52
4.2	Metodología compuesta para la detección del cambio de espesor en la superficie de los contenedores de vidrio transparente.....	53
4.2.1	Procedimiento para analizar las imágenes mediante “TOF” para el modelo compuesto.....	54
4.2.2	Cambio en el valor de profundidad variando la posición espacial de las muestras para el modelo compuesto.....	56
4.2.3	Cambio en el valor de profundidad variando el espesor de las muestras para el modelo compuesto.....	58
4.2.4	Validación de los Modelos lineales para diferentes distancias de adquisición 59	
4.2.5	Aplicación de la técnica “TOFD” compuesta en la detección del cambio de espesor en contenedores de vidrio curvo transparente	61
4.2.6	Modelo compuesto “TOF” para la detección del cambio de espesor en contenedores de vidrio transparente.....	62
4.3	Análisis de resultados	63
5.	Evaluación de las metodologías propuestas para la detección de cambio de espesor en contenedores de vidrio transparente	65
5.1	Evaluación del modelo simple en la superficie de contenedores de vidrio plano transparente.....	65
5.2	Evaluación del modelo simple en la superficie de contenedores curvos transparentes 70	
5.3	Evaluación del modelo compuesto en la superficie de contenedores de vidrios planos transparentes.....	73
5.4	Evaluación del modelo compuesto en la superficie de contenedores curvos transparentes	76
5.5	Análisis de resultados	79
6.	Conclusiones y Trabajo Futuro	80

6.1	Conclusiones	80
6.2	Trabajos Futuros	81
7.	Bibliografía.....	82

1. Introducción

El vidrio es un material inerte, cuenta con propiedades fisicoquímicas únicas como transparencia, durabilidad, hermeticidad y fácil esterilización, se deja moldear fácilmente en su proceso de construcción, por esta razón es muy utilizado en múltiples escenarios e industrias como la alimenticia, farmacéutica, construcción, transporte, tecnología, entre otras. Debido a los diversos requerimientos de calidad y a su amplio uso se debe garantizar que el vidrio esté libre de defectos de fabricación durante todas las etapas de producción, sin embargo, existe la posibilidad de que se produzcan grietas, roturas, burbujas o que contenga impurezas en su interior con otro tipo de materiales como pelos, polvo, etc; estos defectos sobre la superficie del vidrio afectan la estética y la calidad del producto [1]. En un principio la inspección visual se realizaba completamente manual por personal entrenado para este fin, pero debido a las crecientes velocidades de producción y al exigente requerimiento de calidad en cada producto elaborado, fue necesario replantear lo anterior pues los errores humanos debidos al cansancio visual, estrés, diferentes estados de ánimo y subjetividad en la interpretación del operario, fueron causa directa de un mal índice de calidad. En la actualidad los sistemas de inspección visual automática son mejorados cada vez más en gran parte por las nuevas tecnologías, lo que se ve reflejado en equipos con mejores características que ayudan en el proceso de control de calidad en las diferentes líneas de producción. Normalmente en la inspección de calidad de los contenedores de vidrio transparente es común que se utilicen imágenes bidimensionales adquiridas por medio de cámaras RGB, para la detección de grietas, burbujas o de diferentes tipos de suciedades [2], [3]. Pero existen otros tipos de defectos que aparecen aleatoriamente en los contenedores de vidrio durante su fabricación como deformación en la geometría o cambios de espesor no deseados, éstos pueden llegar a ser casi imperceptibles por el ojo humano y requieren necesariamente de sistemas de visión artificial para ser detectados. Este tipo de defecto no es posible percibirlo con cámaras 2D ya que se necesita una dimensión adicional como la profundidad, por lo que el uso de imágenes 3D para este tipo de inspección, es una alternativa viable en aplicaciones industriales y a su vez se convierte en un área con posibilidades de investigación para la comunidad científica. En la actualidad para la detección de espesor en vidrio transparente se utilizan sistemas con técnicas de interferometría los cuales son muy costosos dejando a la pequeña y mediana empresa sin oportunidades para adquirirlos. Los modelos planteados para la detección del cambio de espesor con técnicas TOF están basados en la cámara Kinect V2 de Microsoft, lo que hace que su implementación sea más económica que los métodos tradicionales aunque con ciertas limitaciones en la resolución, estos modelos son planteados como un primer acercamiento al uso de esta tecnología en la detección de espesores en superficies de vidrio transparente.

1.1 Síntesis del problema

El reconocimiento de defectos y la detección de cambios no deseados en la morfología y espesor de las paredes de contenedores de vidrio transparente son un campo de trabajo abierto en la comunidad de visión artificial, e igualmente en el sector industrial ya que representa un desafío el análisis de las diferentes variables que interactúan en la superficie del vidrio transparente a la hora de realizar la adquisición y el posterior análisis de las imágenes de profundidad. Actualmente con el avance tecnológico de nuevos dispositivos y cámaras de reconstrucción 3D con tecnologías como TOF, (las cuales están constantemente mejorando las velocidades y la resolución en la adquisición de imágenes RGBD), y con precios muy favorables para su implementación, se ha causado un mayor interés en replantear soluciones con la ayuda de información 3D para la detección y medición de defectos. En este trabajo, se proponen dos metodologías para la detección del cambio de espesor en un área completa de una de las paredes de un contenedor de vidrio transparente con geometría plana y curva, mediante la adquisición de imágenes de profundidad utilizando la cámara Kinect V2 de Microsoft, la cual trabaja con técnicas TOF

1.2 Objetivo

1.2.1 Objetivo General

Proponer una metodología para detección de cambios de espesor en el cuerpo de los contenedores de vidrio transparente, por medio de “*time of flight distortion*” a partir de las imágenes RGBD adquiridas.

1.2.2 Objetivos Específicos

1. Determinar un método adecuado para la obtención de información 3D en las paredes de los contenedores de vidrio transparente a partir de imágenes RGBD adquiridas con técnicas *Time of Flight Distortion* bajo condiciones controladas.
2. Caracterizar los cambios de espesor en las paredes del contenedor de vidrio transparente que representen un defecto, por medio de descriptores locales aplicados a la información de la nube de puntos obtenida de las imágenes RGBD.
3. Evaluar la metodología propuesta y su respuesta en reproducibilidad y repetibilidad en las imágenes RGBD, obtenidas con la técnica *Time of Flight Distortion* en contenedores de vidrio transparente.

1.3 Productos de investigación

La presente tesis de maestría en Automatización y Control Industrial está fundamentada en la siguiente lista de presentaciones y divulgación en eventos científicos nacionales e internacionales.

Exposición tipo poster

Nombre del Evento: Semana de la Ingeniería ITM

Poster: Detección de cambio de espesor en vidrio plano transparente utilizando el sensor Kinect V2 (TOF)

Lugar: ITM Fraternidad

Fecha: 7 de noviembre de 2017

Exposición tipo oral

Nombre del Evento: XV Encuentro Nacional de Óptica VI Conferencia Andina y del Caribe en Óptica y sus Aplicaciones

Trabajo: Evaluación de la técnica Time of flight distortion para la medición del cambio de espesor en vidrio plano transparente utilizando el sensor kinect V2

Lugar: Universidad Industrial de Santander – Bucaramanga Colombia

Fecha: 23 de noviembre de 2017

Exposición tipo oral (inglés)

Nombre del Evento: SPIE Optical Engineering + Applications

Trabajo: “Detection of change of thickness in transparent flat glass by means of "Time of Flight Distortion" from RGBD data”

Lugar: San Diego, California, USA

Fecha: 17 de septiembre de 2018

2. Marco teórico y estado del arte

En este capítulo se presentan algunas definiciones teóricas básicas, de física y de óptica, aplicadas al comportamiento que presenta un haz de luz al interactuar con un material transparente como el vidrio, posteriormente se incluyen las técnicas activas más utilizadas para la adquisición de imágenes de profundidad por medio de cámaras 3D, también se presenta una descripción de la cámara Kinect V2 de Microsoft la cual fue diseñada para trabajar con la técnica TOF, y que gracias a sus características físicas y a su bajo costo se seleccionó para realizar las adquisiciones de las imágenes de profundidad con las diferentes muestras de vidrio transparente. Por último, se aborda el estado del arte donde se realiza la descripción de las técnicas industriales más utilizadas en la actualidad para la detección del cambio de espesor en la superficie de vidrios transparentes planos y de contenedores de vidrio curvo. Los conceptos abordados en este capítulo servirán de base para una mejor comprensión de la metodología propuesta en la detección del cambio de espesor en las paredes de los contenedores de vidrio transparente.

2.1 Propiedades ópticas de la luz

El comportamiento y las propiedades de la luz pueden ser entendidas usando la teoría de dualidad (onda - partícula) según la física contemporánea, la cual dice que la luz se comporta como una partícula y una onda al mismo tiempo, ya que cuenta con propiedades similares a las ondas, como la difracción y la interferencia, y propiedades similares a las partículas como son la reflexión y la refracción. Por definición, la luz es una radiación electromagnética que puede ser visible o invisible para el ojo humano dependiendo de su longitud de onda. Las propiedades primarias de la luz son la amplitud, la intensidad, la dirección de propagación, la frecuencia o el espectro de longitud de onda y la polarización. La luz viaja en el vacío a una velocidad de 299792.458 km/s [4], [5], con diferentes longitudes de onda y frecuencias, pero cuando cambia de un medio a otro con diferente densidad como aire, agua, vidrio, etc también cambia su velocidad y su longitud de onda. En la **Figura: 2-1** se observa un haz de luz recorriendo la misma distancia X pero a dos velocidades diferentes “ V_A y V_B ” por el hecho de pasar de un medio a otro con densidades diferentes “ A ” y “ B ”,

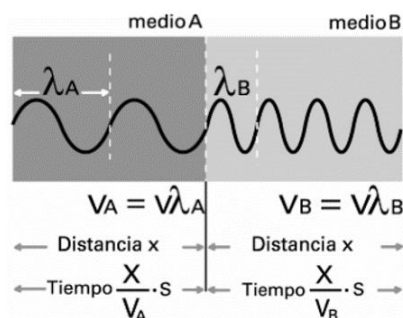


Figura: 2-1 Cambio de velocidad de la luz, en una distancia X , cuando pasa de un medio a otro con densidad diferentes, Fuente [4]

2.2 Fenómenos asociados a la propagación de la luz

La dirección tomada por un haz de luz es la del trayecto que demanda menos tiempo (el más corto), de esta hipótesis se deducen las tres leyes fundamentales para el estudio del comportamiento de la luz. Considerando las distintas trayectorias posibles de la luz para ir de un punto a otro se obtiene: la propagación directa, la reflexión y la refracción. Cuando un haz de luz atraviesa un medio físico, se redirecciona de acuerdo con las características particulares del medio, en la mayoría de los casos diversificándose en haces secundarios y en otras en emisiones energéticas tales como calor. Dentro de las operaciones más comunes tenemos [4], [5]:

2.2.1 Reflexión

La reflexión explica el efecto de la luz cuando las ondas electromagnéticas se encuentran con una superficie que no absorbe la energía radiante (material opaco), la onda inicial es llamada rayo incidente, éste se refleja produciendo un haz de luz denominado rayo reflejado y puede darse de manera especular o difusa.

2.2.2 Reflexión especular

Si la superficie donde llega el haz de luz es lisa y no absorbe luz, se dice que ocurre reflexión especular, donde un solo rayo incidente produce un único rayo reflejado. En la **Figura: 2-2** se observa el rayo incidente, el rayo reflejado y la perpendicular a la superficie, los cuales se encuentran en el mismo plano; el rayo incidente y el rayo reflejado poseen iguales ángulos en relación con la perpendicular y se encuentran sobre lados opuestos de ella.

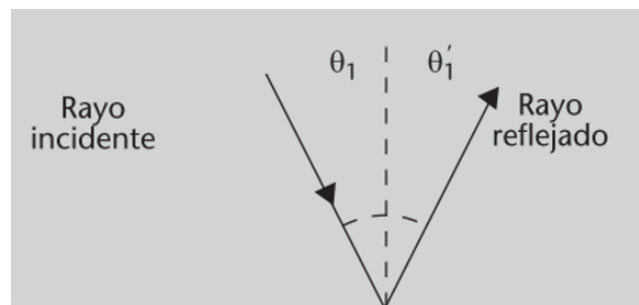


Figura: 2-2 Reflexión especular de la luz donde el ángulo del rayo reflejado es igual al ángulo del rayo incidente, Editado de [5].

2.2.3 Reflexión Difusa

La reflexión difusa describe el efecto de un haz de luz que incide sobre una superficie que posee obstáculos, materiales o irregularidades cuyo tamaño es mayor a la longitud de onda que lo atraviesa, en este caso la energía luminosa se distribuye en todas las direcciones desde el punto de incidencia, este efecto denominado difusión se produce por múltiples reflexiones y refracciones de la luz en numerosas superficies orientadas aleatoriamente, cuando la luz atraviesa medios no homogéneos la mayor parte de la luz que entra en un medio difuso puede ser dispersada hacia fuera del mismo sin gran pérdida por absorción. Un reflejo difuso ideal reflejará la misma cantidad de luz en todas las direcciones en el mismo hemisferio de la superficie reflectante [6] como se observa en la **Figura: 2-3**

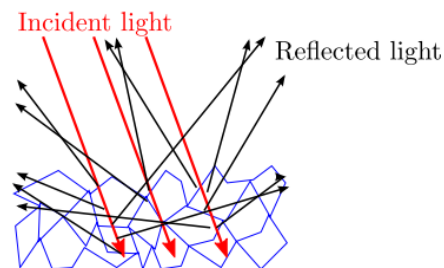


Figura: 2-3 Reflexión difusa de la luz, donde los rayos reflejados se distribuyen en todas las direcciones, Fuente [6]

2.2.4 Refracción

La refracción de la luz se da cuando un haz de luz pasa de un medio a otro con diferente índice de refracción, esto produce un cambio en su dirección debido a la diferencia de velocidad de propagación que tiene la luz en los diferentes medios. La relación entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de propagación de una longitud de onda determinada en un material o sustancia transparente, se conoce como índice de refracción, el índice de refracción del aire es 1.0002926. En el caso particular de esta tesis el haz de luz pasa del aire (medio 1) al vidrio común (medio 2), donde el índice de refracción relativo es 1.52, esto quiere decir que la luz es 1.52 veces más rápida en el aire que en el vidrio, si la luz pasa de un medio más rápido a otro más lento (por ejemplo del aire al vidrio) el ángulo de refracción es menor que el de incidencia como se aprecia en la **figura 2-4**; ahora, si consideramos que el rayo pasa de un medio de mayor índice de refracción a otro con menor índice de refracción, el ángulo de incidencia es mayor con respecto a la normal, si el ángulo sigue aumentando llegará al “ángulo crítico” donde el rayo de refracción saldrá a un ángulo

de 90° con respecto a la normal y por encima de este valor el rayo tendrá una reflexión total [4], [5] como se muestra en la **figura 2-5**

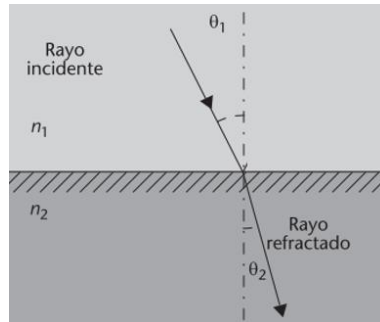


Figura: 2-4 Refracción de la luz, cuando pasa de un medio a otro con mayor índice de refracción, Fuente [5]

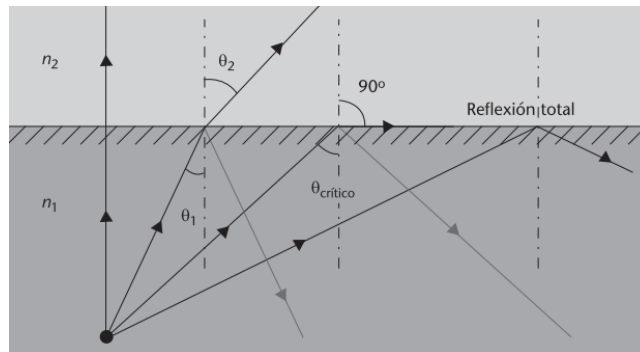


Figura: 2-5 Refracción de la luz, cuando pasa de un medio a otro con menor índice de refracción, Fuente [5]

2.2.5 Dispersión

La velocidad de una onda electromagnética es el producto de su frecuencia y su longitud de onda en el vacío. La velocidad es la misma para todas las longitudes de onda del espectro visible, pero cuando ésta atraviesa una sustancia o material la velocidad se reduce y varía para cada una de las distintas longitudes de onda del espectro, este efecto se denomina dispersión, la causa de que se produzca la dispersión es que el índice de refracción del material es diferente al del aire, disminuyendo para las longitudes de onda más largas (rojo), que se desvían menos que las cortas (azul-violeta). Cuando la luz atraviesa un prisma como se aprecia en la **Figura: 2-6**, el rayo de salida ya no es paralelo al rayo incidente y gracias a la dispersión puede separar las diferentes longitudes de onda contenidas en un haz incidente y formar un espectro [4], [5].

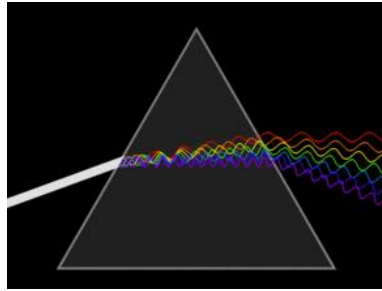


Figura: 2-6 Dispersión de la luz a través de un prisma de vidrio, Fuente Wikipedia

2.2.6 Absorción

Llamamos absorción a la conversión de luz en otra forma de energía, las cuales pueden ser: energía calórica (calentamiento por absorción), energía eléctrica (como la generada en las células fotoeléctricas), o en energía química (como la fotosíntesis realizada por las plantas). También puede ocurrir que cambie a una radiación de diferente longitud de onda (fluorescencia). La pérdida de energía está directamente relacionada con el tipo de material, su transparencia u opacidad, cada material tiene un coeficiente de absorción que varía para cada longitud de onda, este coeficiente es muy bajo para materiales de alta transparencia mientras que para materiales de gran opacidad es tan grande que la intensidad final es prácticamente cero medida en distancias muy cortas [5].

2.3 Técnicas activas para la adquisición de imágenes de profundidad

Las cámaras para la adquisición de imágenes de profundidad (también conocidas como cámaras 3D) vienen evolucionando en sus diseños e incorporando diferentes tecnologías con el fin de lograr cada vez mayores velocidades de adquisición, con aumentos significativos en la resolución, todo esto con tamaños más reducidos y a precios más asequibles permitiendo ser utilizadas en nuevos y diversos ambientes como: inspección visual, seguimiento o *tracking* de objetos o personas, video vigilancia, procesamiento de imágenes médicas, robots controlados o guiados por visión, reconocimiento y/o reconstrucción de objetos y control de calidad a nivel industrial, es por esto que el uso de cámaras 3D es una alternativa viable en aplicaciones industriales y a su vez se convierten en un área de interés para la comunidad científica [7]. Los sistemas comerciales de captura de información tridimensional proporcionan un conjunto de valores discretos que corresponden a la profundidad con la que son vistos los puntos de la superficie de un objeto desde los sistemas de adquisición, este conjunto de muestras ordenadas recibe el nombre de imagen de profundidad o rango, ya que en vez de representar un valor de intensidad o de un color, se representa el valor de profundidad de los puntos. Los sensores diseñados para la estimación de profundidad que

trabajan con técnicas de medida sin contacto físico, se pueden clasificar en ópticos y no ópticos dependiendo de la longitud de onda empleada en su funcionamiento, las técnicas no ópticas como el sonar y el microondas (que cuentan con propiedades de resolución angular bastante limitadas), son utilizadas generalmente en aplicaciones *GPS (Global Positioning System)* o *Synthetic Aperture Radar (SAR)*. A diferencia de estas técnicas, los métodos ópticos son más fiables y proporcionan medidas de alta precisión y resolución. Las técnicas de medición ópticas pueden ser pasivas y activas, siendo las activas las que necesitan de una fuente de luz externa para trabajar [8], [47]. En la **figura 2-7** se observa el diagrama esquemático de las principales técnicas que trabajan con visión activa para la adquisición de imágenes de profundidad, donde se observan la luz estructurada, interferometría y TOF, cada una con sus fortalezas y limitaciones:

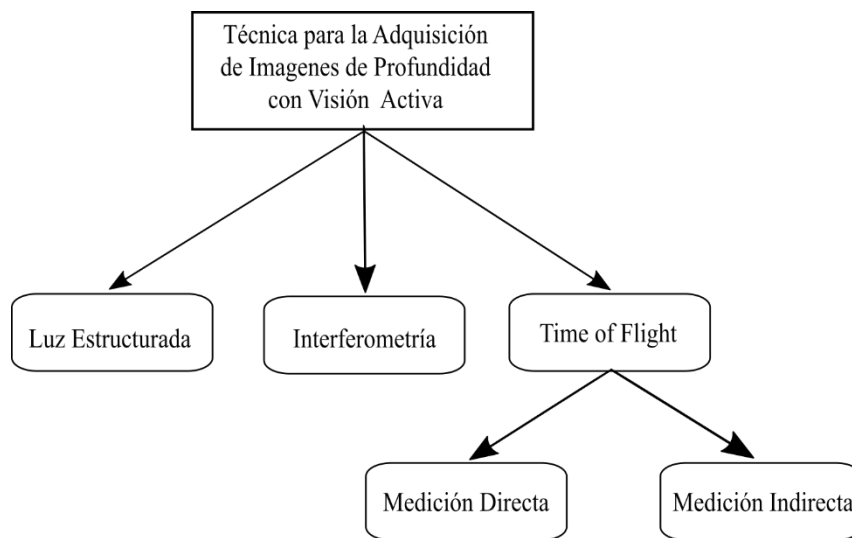


Figura: 2-7 Clasificación de técnicas activas para la adquisición de imágenes de profundidad

2.3.1 Luz estructurada

La generación de imágenes de profundidad por medio de la técnica de luz estructurada está compuesta mínimo por un proyector y una cámara; el sistema opera proyectando un patrón de luz sobre la escena que se desea analizar, luego la cámara registra la imagen que produce el patrón sobre los objetos, creando una secuencia temporal con los diferentes patrones de brillo. La ventaja que tienen los escáneres 3D de luz estructurada es la velocidad, ya que escanean múltiples puntos a la vez generando un campo de visión entero, lo que reduce el problema de la deformación por movimiento [8].

2.3.2 Interferometría

La medición de distancia por medio de interferometría, aunque no es precisamente una imagen de profundidad, es una técnica muy empleada por su excelente resolución del orden de los nanómetros. Esta técnica consiste en el análisis de patrones de intensidad, se basa en la superposición de dos fuentes de ondas con diferente amplitud pero con la misma frecuencia, la onda resultante después de la reflexión por el objeto analizado se correlaciona con la onda original emitida en un punto determinado, el resultado de esta medida será interpretada por el interferómetro, que emplea las diferencias de ondas monocromáticas para medir longitudes de onda. Contando el número de máximos y mínimos producidos en la interferencia se puede estimar la distancia entre el elemento emisor y la superficie con una alta precisión [9]

2.3.3 Time of Flight

El tiempo de vuelo es una técnica que se utiliza para conocer la distancia que existe entre un sensor TOF y un objeto dentro de la escena a analizar. Esta medida se basa en el tiempo que emplea la emisión de un haz de luz y su regreso de nuevo al sensor después de ser reflejada por el objeto; el tiempo empleado por el haz de luz es proporcional a la distancia a la que se encuentra el objeto, en esta técnica se pueden utilizar varios tipos de señales siendo las más utilizadas las ondas de sonido, las electromagnéticas y las de luz, en este trabajo se analizará sólo la emisión de ondas de luz cercana al infrarrojo NIR con una longitud de onda aproximada de 850 nm, que son las que utilizan los equipos comerciales como el Kinect V2. Este tipo de luz no es visible al ojo humano y cuenta con varias ventajas como son: la velocidad de respuesta, un rango de alcance amplio y poca distorsión con la luz externa. Existen dos técnicas para calcular el valor de la distancia de un objeto por medio de TOF: la primera es la medición directa (D-TOF), ésta mide directamente la diferencia de tiempo entre el pulso de inicio sincronizado con la fuente de luz y la señal de stop cuando retorna la señal reflejada al sensor, y la segunda es la medición indirecta (I-TOF) que calcula la distancia de los objetos indirectamente conociendo la diferencia que presentan las fases de una onda continua emitida y la misma onda después de ser reflejada por los objetos que se encuentran dentro de la escena [8].

2.3.4 Medición Directa "D-TOF"

También conocido como modulación de pulso, el principio de operación de esta técnica para medir la profundidad a la que se encuentra un objeto, se basa en calcular directamente el tiempo empleado por un haz de luz en forma de pulso para recorrer la distancia completa desde la salida del emisor hasta llegar al receptor después de haber sido reflejada por los

objetos que se encuentran en el trayecto de la escena analizada, como se aprecia en la **Figura: 2-8**.

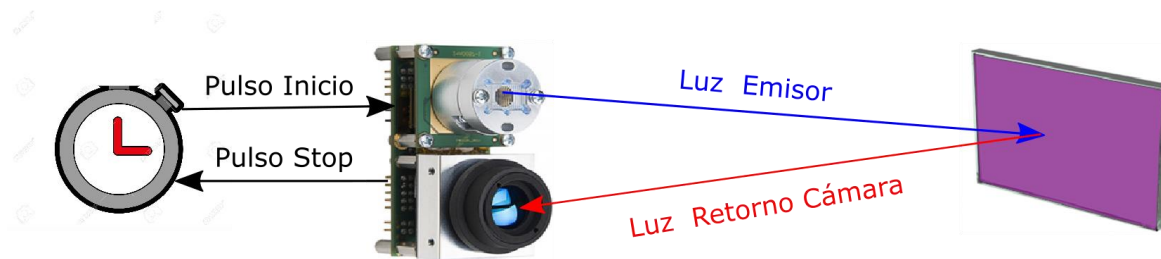


Figura: 2-8 Medición de profundidad de un objeto, por medio de “TOF” Directo

La relación entre el tiempo empleado por el haz de luz y la distancia recorrida viene dada por la ecuación 2-1

$$T = 2 \frac{D}{C} \quad 2-1$$

C = Velocidad de la luz en el aire 299705543 m/s

D = Distancia recorrida por el haz de luz (se multiplica x 2 por regresar a la cámara)

T = Tiempo empleado por el haz de luz en llegar al sensor luego de ser reflejado por el objeto.

2.3.5 Medición Indirecta "I-TOF"

El principio de operación de esta técnica se basa en la generación de una señal modulada la cual puede ser sinodal o cuadrada, siendo la modulación de onda cuadrada la más común porque se puede generar fácilmente utilizando circuitos digitales. La señal es emitida a una frecuencia fija y conocida, y se proyecta a la escena que se desea analizar, luego la onda al ser reflejada por los objetos que se encuentran en su trayecto regresa al receptor un instante de tiempo después; al tratarse de dos señales periódicas moduladas se puede calcular el tiempo transcurrido en llegar la segunda onda, conociendo el desplazamiento que existe entre las fases de las señales emitida y la que retorna, la distancia a la que se encuentra cada objeto dentro de la escena tiene una correlación directa con el desfase que existe entre las dos señales [9], el diagrama se observa en la en la **figura 2-9**.

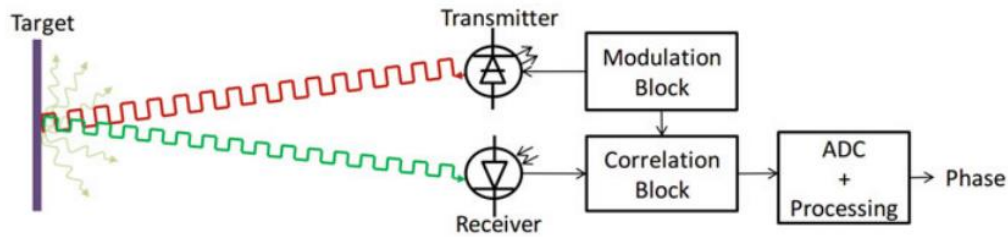


Figura: 2-9 Medición de profundidad de un objeto, por medio de “TOF” Indirecto, fuente [9]

En el método “ITOF” la fuente de luz oscilante de onda cuadrada se enciende por un breve tiempo, luego al retornar la señal reflejada por los objetos en la escena lo hace con un desfase en la señal proporcional a la distancia recorrida. Para conocer la medida del desfase se utiliza la carga de cuatro condensadores desfasados cada uno en 90 grados como se observa en la **Figura: 2-10**, utilizando esta técnica el ángulo de desfase entre la luz emitida y la que retorna se puede calcular con la ecuación 2-2, y para hallar la distancia conociendo el ángulo de desfase se utiliza la ecuación 2-3, esta señal es calculada para cada pixel en paralelo logrando de esta manera tener una imagen completa de profundidad.

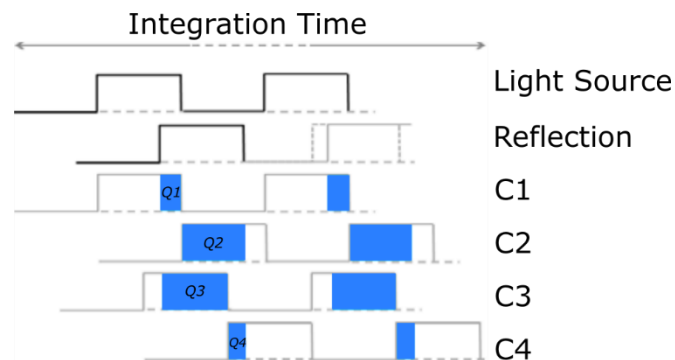


Figura: 2-10 Método mediante carga de condensadores para conocer el desfase entre la señal de luz emitida y la reflejada con (I-TOF), fuente [9]

Φ = Ángulo de desfase entre la luz emitida y la luz reflejada
 $Q1, Q2, Q3$ y $Q4$ = carga en condensadores desfasados 90° cada uno

$$d = \frac{c}{4\pi f} \Phi \quad 2-3$$

d = distancia de profundidad del objeto medido
 c = velocidad de la luz en el aire (299705543 m/s)

2.4 Cámara Kinect

Las cámaras de profundidad RGBD que trabajan con la técnica TOF, son dispositivos compactos que proporcionan mapas de profundidad densos en tiempo real, estas cámaras funcionan iluminando la escena con una fuente de luz cercana al infrarrojo (850 nm), invisible para el ojo humano, luego retorna la luz reflejada por los objetos y es detectada mediante un sensor CMOS diseñado especialmente para responder al mismo espectro de luz enviado inicialmente, después un sistema de detección de fase se encarga de distinguir el cambio de fase entre la iluminación y la reflexión, y calcular la distancia real de cada objeto [11] como se aprecia en la **Figura: 2-11**

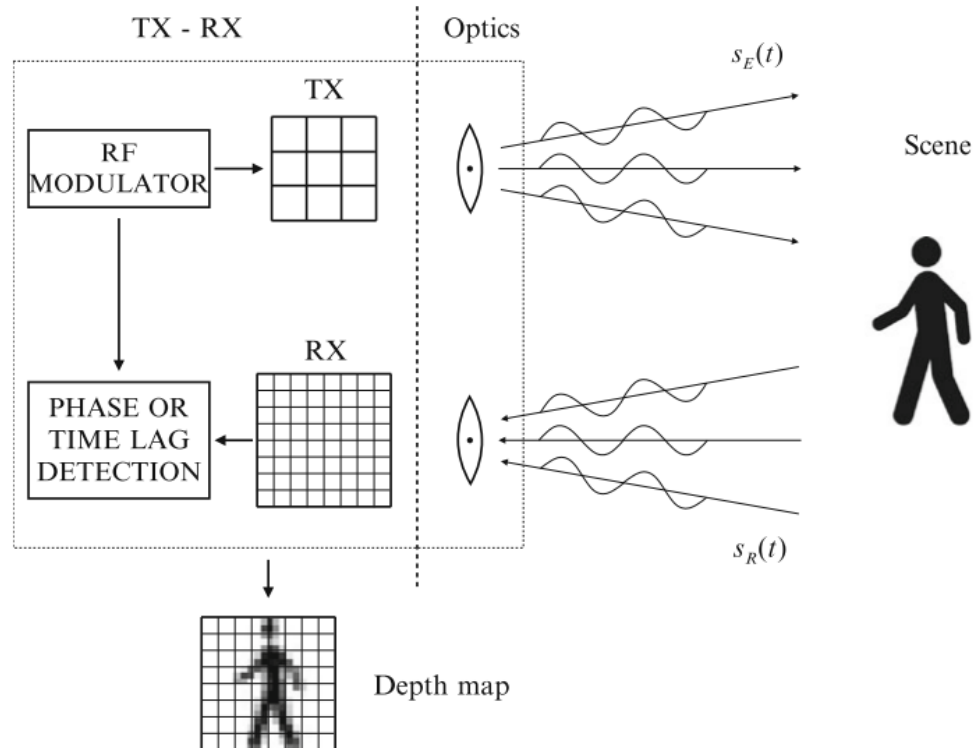


Figura: 2-11 Generación de una imagen de profundidad por medio de una cámara con (I-TOF), fuente [11]

2.4.1 Características técnicas de la cámara Kinect V2

La cámara de adquisición 3D Kinect V2 es un dispositivo compacto que fue diseñado para la adquisición de audio mediante un arreglo de micrófonos, imágenes RGB HD e imágenes de profundidad a bajo costo [17]. Este dispositivo fue desarrollado inicialmente como un accesorio para la consola *Xbox one*, siendo lanzado por Microsoft en el año 2014; a diferencia de la primera versión Kinect V1, que salió al mercado en el año 2010 y la cual adquiere los

mapas de profundidad con la técnica de luz estructurada, la nueva versión incorpora para la medida la técnica TOF, lo que proporciona a este dispositivo mejoras de capacidad y resolución frente a la versión anterior [15], [16], [18], como se aprecia en la tabla 1, donde se realiza un comparativo entre las dos versiones. Las principales características que se encuentran en el Kinect V2 son: una cámara a color RGB con resolución de 1920 x 1080 pixeles, un sensor TOF para adquirir mapas de profundidad densos 3D de 16 bit ADC, con resolución de 512 x 424 pixeles, el rango de la longitud de onda infrarroja es de 860 nm (que es emitida mediante una frecuencia de modulación con un rango promedio de 80 MHz), la incertidumbre en la medida de profundidad es menor al 0.5 % de la distancia a la que se encuentra el objeto analizado, la frecuencia máxima de adquisición es de 30 Hz, cuenta con un campo de visión Field of View de 70° horizontales por 60° verticales, su rango de operación va desde los 0.7 a 4.2 metros y la potencia consumida por la cámara es de 2.1 *wattios*, adicionalmente cuenta con una conexión de salida USB 3.0 que permite adquirir esta información de manera fácil mediante un adaptador a un PC, también cuenta con unas librerías de trabajo diseñadas especialmente para su operación “*driver open source*” llamadas librerías SDK, que se pueden descargar de la página oficial de Microsoft para ser utilizado libremente con diferentes Software de programación y en varias plataformas como Windows y Linux [12], [13], [14], [46] lo que hace del dispositivo de adquisición Kinect V2 una de las cámaras 3D más eficientes del mercado teniendo en cuenta la relación costo beneficio. En la **Figura: 2-12** se observa la configuración interna del Kinect V2, la cual cuenta con dos cámaras de adquisición y el sensor láser con las medidas en centímetros entre cada una.

Tabla 1 Comparación de tecnologías del Kinect V1 vs Kinect V2, Fuente [18]

Especificaciones	Kinect V1	Kinect V2
Técnica	Luz estructurada	Time of Flight
Año	2010	2014
Resolución cámara color	640 x 480 x 16 bit por pixel 4:3	1920 x 1080 x 16 bit por pixel 16:9
Resolución cámara Depth	320 x 240 x 11 bit-bit IR	512 x 424 x 16 bit ToF
Rango	0.8 m a 4.5 m	0.5 m x 4.5 m
Campo de Visión	57.5°H - 43.4° V	70° H - 60° V

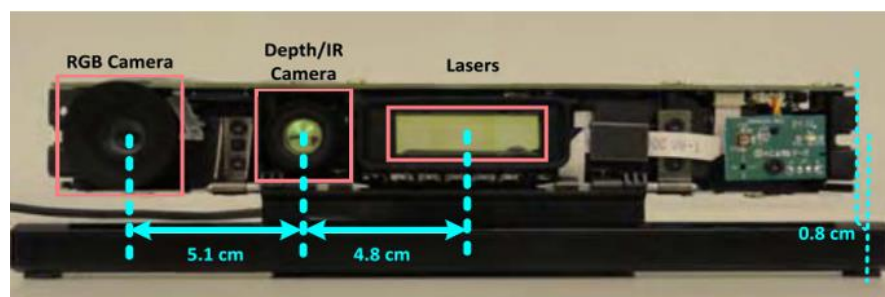


Figura: 2-12 Configuración Interna del Kinect V2 de Microsoft, Fuente [15]

2.5 Estado del arte

El vidrio es un material inerte que cuenta con propiedades fisicoquímicas únicas como durabilidad, hermeticidad, resistencia, transparencia [19] y gracias a que se deja moldear fácilmente en su proceso de construcción, es utilizado en diversos escenarios como la industria alimenticia, farmacéutica, construcción, transporte, tecnológica, entre otras. Debido a los diversos requerimientos de calidad se debe garantizar que el vidrio esté libre de defectos de fabricación durante todas las etapas de producción, sin embargo, existe la posibilidad de que se produzcan grietas, roturas, burbujas, o que contenga impurezas en su interior tales como pelo, polvo u otros, los cuales afectan la estética y calidad del producto [1]. Los sistemas de inspección visual automática, ayudan en el proceso de control de calidad en las líneas de producción de vidrio y es común que en estos sistemas se utilicen imágenes bidimensionales adquiridas por medio de cámaras RGB, para inspeccionar la calidad del vidrio [19], [20], [48]. Adicionalmente existen otros tipos de defectos que aparecen aleatoriamente en la superficie del vidrio durante el proceso de fabricación, como variaciones en la geometría o cambios de espesor no deseados en alguna de las caras del contenedor. Estas variaciones requieren necesariamente para su detección de otra información como son los datos de profundidad, es por esto que el uso de imágenes 3D para inspeccionar defectos, se ha convertido en una alternativa de aplicación industrial y en un área a tener en cuenta para la comunidad científica. En la literatura consultada sobre la medición y detección del cambio de espesor en contenedores de vidrio transparente se encontraron diferentes trabajos los cuales se resumen a continuación.

En «Novel Float Glass Thickness Measurement based on Image Processing» [21] y «Study on a novel laser measurement system for float glass thickness»[22], se realiza la medición del espesor en una lámina de vidrio plano transparente en tiempo real, la medición es tomada directamente en la línea de producción mediante un método no invasivo, basándose en el principio de reflexión y refracción de un haz de luz láser el cual es proyectado sobre la superficie del vidrio plano transparente a un ángulo de incidencia conocido, posteriormente mediante una cámara de visión CCD de dos dimensiones, son adquiridos los rayos de luz resultantes de la reflexión y refracción sobre la superficie del vidrio; la cámara utiliza un algoritmo que procesa la morfología de la imagen adquirida, correlacionando la distancia de los rayos de luz adquiridos con la medida del espesor del vidrio analizado, el rango de medida con esta técnica se encuentra con vidrios de 2 mm hasta 10 mm de espesor, con este método la resolución en la medida depende más de las características del lente empleado que del mismo algoritmo desarrollado; además se han obtenido resultados con resoluciones de hasta 0.3 mm de espesor, en la **Figura: 2-13** se observa el diagrama esquemático para la medición del espesor en un vidrio plano transparente en línea, compuesto por una luz láser y una cámara CCD como receptor.

Es una limitante que sólo se pueda medir el espesor en un punto específico, por ello se instaló al montaje un drive adicional (sistema de desplazamiento) para recorrer la superficie completa del vidrio plano transparente y tener una medida del espesor en un área mayor. Un trabajo reciente es el de «Measuring the thickness of transparent objects using a confocal displacement sensor»[23], el cual utiliza un lente con desplazamiento focal, que se ajusta dependiendo del espesor del material transparente que se desea medir, la corriente que ingresa al lente también se regula dependiendo de la necesidad; para realizar la medición del espesor se proyecta un haz de luz láser a través de los lentes y de la placa transparente con espesor desconocido, una vez es reflejado y refractado el rayo por los lentes y la pieza transparente, éste es captado por un sensor de potencia que mide y envía el valor censado hacia una interface realizada en el software de programación *Labview*, luego de ser graficada las magnitudes de la corriente y la potencia de la señal recibida, éstas se correlacionan con el espesor del material transparente desconocido. En la **Figura: 2-14** se observa el diagrama esquemático utilizado en la detección del espesor donde la corriente de salida desde el PC (flecha de corriente en amarillo) es empleada para ajustar el desplazamiento focal del lente y la medición de potencia del rayo láser que retorna (flecha de señal en amarillo) después de refractarse a través de los diferentes lentes, incluyendo el material transparente con espesor desconocido.

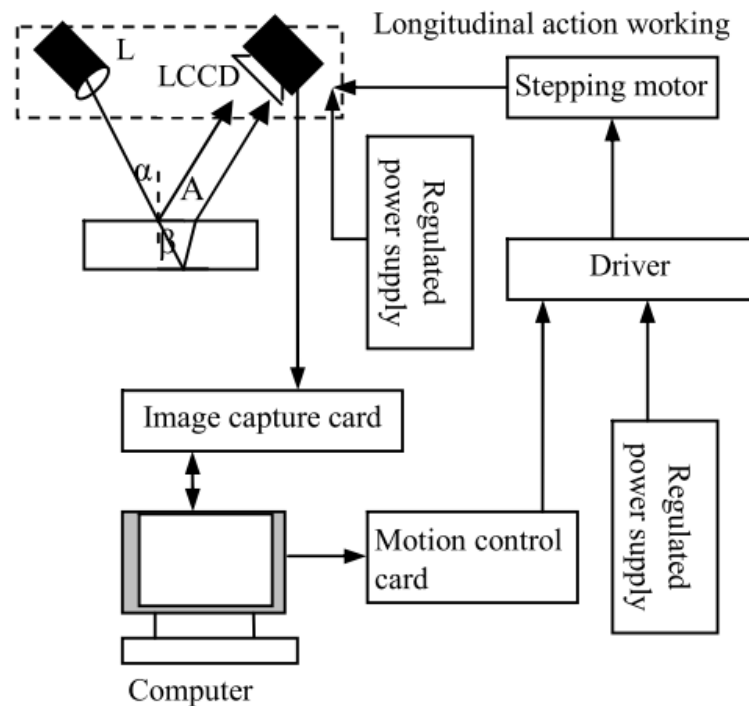


Figura: 2-13 Medición del espesor de un vidrio plano transparente en una línea de producción, Fuente [21]

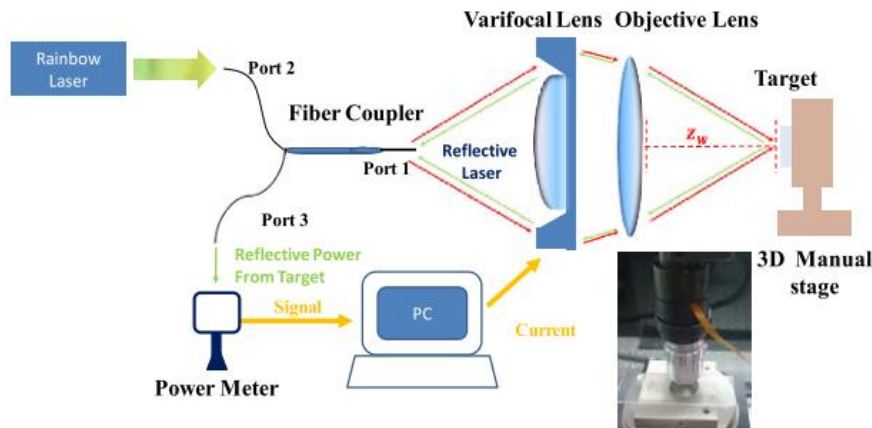


Figura: 2-14 Medición del espesor en un vidrio, mediante la correlación existente con la potencia del haz de luz reflejado, Fuente [23]

Una de las técnicas que cuenta con mayor resolución en la medición del espesor en la pared de los contenedores de vidrio transparente, es la que trabaja con principios de interferometría óptica, en [24], se realiza una medición de espesor y del índice de refracción en una muestra plana de material transparente, por medio de dos lecturas ópticas con cambio de fase producidas por un diodo láser que pasa por un interferómetro de auto mezclado, y las cuales son censadas por fotodiodos después de atravesar el material transparente. Para generar la refracción del haz de luz se debe colocar la muestra del material transparente a una inclinación conocida como se aprecia en la **Figura: 2-15**, donde se observa la configuración del *Self-Mix Interferometer*. Idealmente la resolución que ofrece este método es del orden de micrómetros con un error de precisión del 2 %.

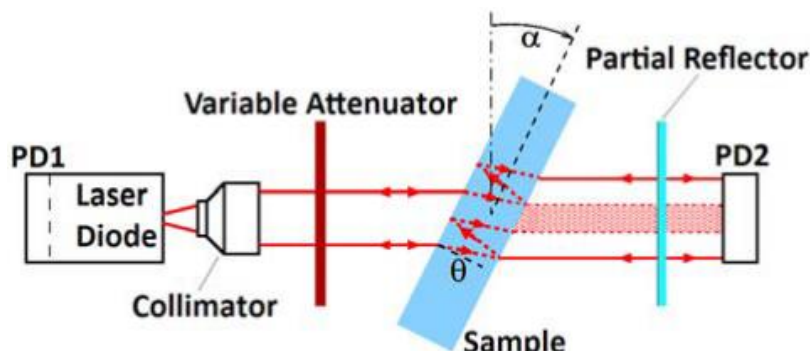


Figura: 2-15 Medición del espesor y del índice de refracción en un material transparente, mediante un *Self-Mix Interferometer*, Fuente [24]

En [25], se aprecia un trabajo similar al anterior, en el cual utilizan *full-field Optical coherence microscopy* para medir a la vez el espesor y el índice de refracción en materiales transparentes como lentes de vidrio, es muy utilizado en equipos de laboratorio y en aplicaciones de biomédica; la resolución es del orden de uno pocos micrómetros, estos

equipos deben ser utilizados en ambientes con condiciones controladas por lo que su uso está limitado sólo a laboratorios donde se realizan medidas manualmente.

En [26], se propone un sistema para medir espesor en objetos transparentes utilizando la combinación de un *low-coherence interferometry* que entrega la información del espesor de la pieza transparente y con *focal optics* que mide y entrega el índice de fase; relacionando esta información con el espesor se obtiene la información del índice de refracción. En el artículo consultado se analizaron ocho muestras con diferentes materiales transparentes como sílica fundida, *cubiertas de vidrio* entre otros, donde los errores de medición promedio en el espesor estuvieron entre 0.133 % y 0.066 %.

Siguiendo con equipos de medida de laboratorio tenemos el trabajo de [27], el cual utiliza un interferómetro *Fizeau* con ajuste de longitud de onda, que mediante un algoritmo de cambio de fase compensa los problemas generados durante la calibración del equipo, y también por la no linealidad del cambio de fase de orden uno. Los resultados experimentales entregados por esta técnica mostraron una precisión en la variación del espesor óptico en una placa BK de 3 nm, en la **Figura: 2-16** se observa: en (a) el interferómetro *Fizeau* con ajuste de longitud de onda adquiriendo una imagen del lente de vidrio ref BK7, en (b) se muestra la imagen original

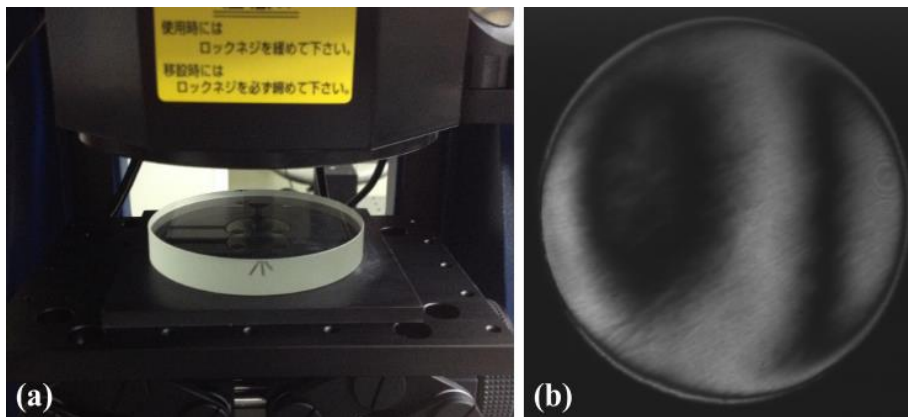


Figura: 2-16 Medición del espesor y del índice de refracción en un lente ref BK7, mediante un *Fizeau Interferometer*, Fuente [27]

También se encontraron algunas técnicas donde se realizaron algunos cambios a los interferómetros con el fin de obtener mejores resultados, como el caso de [28], el cual utilizó un interferómetro con un haz de luz láser *dual heterodyne* de ultra precisión para la medición del espesor en muestras de vidrio, algunas ventajas obtenidas con esta técnica son: el proceso de modulación para la detección y el tratamiento de la información es más simple, con alta precisión de medición del espesor, buena linealidad y respuesta dinámica rápida; en los resultados se obtuvieron errores inferiores al 0.8 %, mientras que en [29], se presenta un

trabajo basado en el interferómetro de doble rendija de Young, el cual mide la variación del espesor en una superficie de vidrio en movimiento y en tiempo real, la técnica se basa en la interferencia de la luz en la doble rendija y gracias a la robustez del sistema, permite que sea inmune a las duras condiciones del ambiente que se encuentran en las líneas de producción, esta técnica permite una detección del cambio de espesor a una velocidad de 100 mm por segundo, con una repetitividad en la medición de 3 nm, y puede soportar movimientos de balanceo en la medición hasta de 10 mm de amplitud y frecuencias de 1 Hz, lo que lo hace indicado para implementar en líneas de producción de vidrio plano transparente. En [30], se propone un método utilizando la medición del segundo armónico para conocer el espesor del vidrio con alta precisión, la técnica de medición está basada en un interferómetro con láser *Multi-haz heterodyn* el cual combina el efecto *Doppler* con la tecnología *heterodyn*. En la medición se utiliza un espejo oscilante en la trayectoria del haz de luz, para generar una vibración en la aceleración uniforme de la luz que incide en la superficie del vidrio, luego se aplica la transformada rápida de Fourier a la diferencia con la segunda señal heterodyn armónica, en las simulaciones realizadas se muestra que puede trabajar en condiciones ambientales industriales con buena linealidad, con alta precisión y con errores de medición inferiores al 0.02 %.

Por último se muestra el trabajo de [31], el cual se basa en el análisis de la medición de la frecuencia de banda angosta generada por un interferómetro para la detección del espesor en contenedores de vidrio curvo (botellas), se utilizó un interferómetro estándar **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, la parte optoelectrónica está compuesta por un generador de luz láser con una longitud de onda controlada con precisión y que varía dentro de un ancho de banda estrecho controlado, también cuenta con un divisor de haz de luz *Beam-splitter* y un foto detector cuya salida es filtrada y digitalizada, los datos obtenidos constan de una serie de componentes espectrales, donde el de más peso representa el espesor del vidrio. El método para buscar y localizar esta frecuencia es fundamental para una implementación en tiempo real en una línea de producción, aplicando la transformada discreta de Fourier (DFT), el sistema cuenta con una técnica propia para buscar la frecuencia correcta con un menor costo computacional, los resultados obtenidos han sido evaluados con la inspección de calidad de botellas redondas de vidrio en un ambiente industrial real, donde el principal aporte fue un nivel muy alto en la detección de espesor de la botella de vidrio a un costo computacional muy reducido, para obtener una medición del espesor en varios puntos alrededor de la botella fue necesario implementar un sistema de rotación el cual realiza un giro de 360° como se aprecia en la **Figura 2-18**

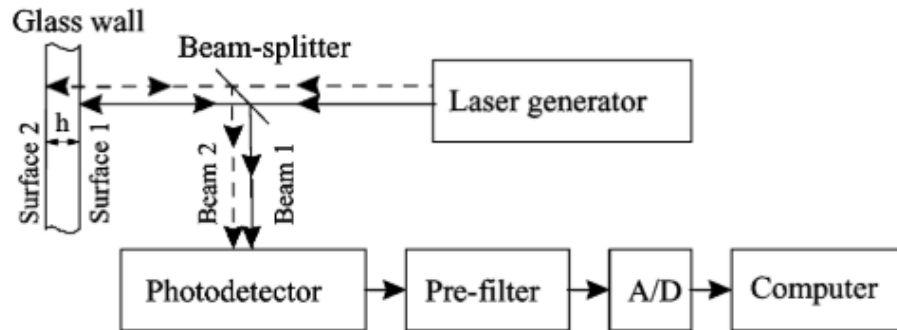


Figura: 2-17 Diagrama esquemático de un interferómetro para la detección del espesor en botellas de vidrio transparente, Fuente [31]

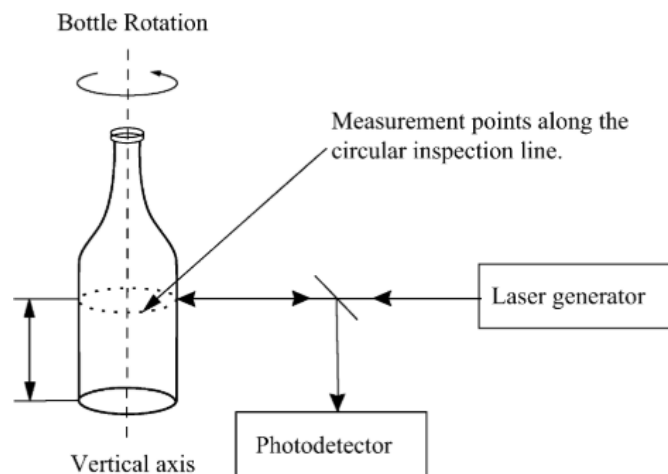


Figura: 2-18 Diagrama del montaje físico, para medir el espesor en botellas de vidrio transparente en una línea de producción, Fuente [31]

Todos los trabajos consultados anteriormente tienen en común que la medición del espesor en la superficie del vidrio transparente, se realizó con la ayuda de un haz de luz láser, con las diferentes técnicas se obtuvieron muy buenos resultados en cuanto a la resolución de la medida, llegando a ser del orden de décimas de milímetro hasta nanómetros, pero analizando los diferentes procedimientos todos tienen una limitante en común y es que sólo se puede medir el valor del espesor del vidrio transparente en un solo punto de la superficie a la vez, cuando se desea conocer el valor del espesor en diferentes puntos de la misma superficie se tiene que recurrir a diferentes procedimientos extras como rotar el contenedor de vidrio en el caso de botellas redondas, o realizar desplazamientos lineales en el caso de vidrios planos. Otra opción utilizada para la medición del espesor en contenedores de vidrio es la realizada fuera de línea, con equipos especializados de laboratorio en ambientes controlados garantizando medidas muy confiables y precisas en la superficie de los contenedores de vidrio, pero este método tiene la desventaja de ser una medición lenta y aleatoria ya que se debe realizar fuera de la línea de producción (“offline”), siendo imposible hacer la inspección

a todos los envases y por consiguiente no se puede garantizar una buena calidad. Adicionalmente estas técnicas se caracterizan por contar con equipos de difícil adquisición por ser muy especializados, y en casos exclusivos de algunas empresas, haciéndolos muy costosos para ser adquiridos por la mediana y pequeña industria.

3. Adquisición de imágenes 3D en contenedores de vidrio transparente

El objetivo de este capítulo es desarrollar una metodología de adquisición práctica, para las diferentes imágenes de profundidad tomadas a la superficie de las muestras de vidrio transparente con geometrías planas y curvas, también analizar diversos parámetros que intervienen de alguna manera en las experimentaciones los cuales se dividen en dos grupos: Parámetros constantes y variables. Las adquisiciones de las imágenes de profundidad se realizaron con dos técnicas diferentes: la primera llamada adquisición simple se emplea el Background como referencia para encontrar el espesor del vidrio transparente mediante *TOF Distortion* y la segunda técnica llamada adquisición compuesta se utiliza como referencia una muestra de material opaco con el mismo espesor del vidrio analizado con el fin de lograr una mayor resolución en la medida del espesor como se verá más adelante. Una vez adquiridas las imágenes RGBD con las dos técnicas anteriores se realizó el preprocesamiento a todas las imágenes de profundidad para la corrección del ruido generado por múltiples factores inherentes durante la adquisición, el resultado de este capítulo son imágenes de profundidad de los diferentes contenedores de vidrio transparente planos y curvos, que son el insumo para realizar y proponer una metodología en la detección del cambio de espesor en los contenedores de vidrio transparente.

3.1 Adquisición de las imágenes de profundidad

El vidrio transparente y en general los materiales translúcidos, son un desafío a la hora de realizar una adquisición de la imagen con las técnicas tradicionales de escaneo, debido a que la mayor parte de la luz que llega a la superficie se refracta y sólo una pequeña porción es reflejada, es por esto que para el desarrollo del método de adquisición de las imágenes 3D, se analizaron los diferentes parámetros que afectaban directa o indirectamente el resultado, con el fin de minimizar los factores externos durante las experimentaciones que generaran una posible variación de los datos. Para la adquisición de las imágenes se utilizó la cámara Kinect V2 en conjunto con la librería SDK V2 diseñadas por Microsoft y entregadas al público en general bajo licenciamiento de “*Open source*”; para el desarrollo de la interface de adquisición y de análisis de los datos RGB, se trabajó con los *softwar* de programación Matlab y Labview; para la comunicación del Kinect con la plataforma de Labview se descargó la librería desarrollada por *Maker Hub* disponible también como “*Open source*”. Para el cumplimiento del primer objetivo específico que comprende la adquisición de las imágenes de profundidad, en las paredes de los contenedores de vidrio transparentes por medio de TOF, se realizó un montaje experimental en un ambiente controlado (el laboratorio de óptica, Visión artificial del ITM), se instaló un soporte de fijación robusto que sujeta la cámara Kinect V2, orientando la luz infrarroja y la cámara de profundidad en un plano paralelo a las muestras de vidrio, las cuales a su vez están localizadas (posicionadas y orientadas) sobre una superficie plana y opaca, a manera de background con un tamaño de 450 mm x 450 mm. El soporte de fijación permite el desplazamiento de la cámara sobre el

eje z, variando la distancia de la cámara con respecto al background, con tres valores fijos de posición: 1100 mm como distancia mínima, 1200 mm como distancia media y finalmente como distancia máxima 1300 mm. Adicionalmente el centro (x, y) de la superficie del background, se hizo coincidir con el centro del campo de visión “*field of view*” de la cámara de profundidad del Kinect V2 como se aprecia en la **figura 3-1**. Durante la realización de las experimentaciones se tuvieron en cuenta las características de la cámara Kinect V2 y las condiciones externas que pudieran llegar a alterar los datos de profundidad. Como características propias de la cámara consideramos la resolución y la precisión de los datos de profundidad, analizada en [13], la incidencia de la temperatura interna y externa de la cámara en la medida de profundidad (principalmente durante un tiempo prolongado de adquisiciones continuas), contemplado por [32]. Como parámetros externos en el montaje se consideraron: la distancia de adquisición de las imágenes que van desde la base de la cámara hasta la superficie del background, el cambio de espesor en las muestras de vidrio transparente y las múltiples reflexiones de la luz que se generan como resultado de las diferentes formas de la superficie en los contenedores analizados (que pueden variar en planos y curvos); adicionalmente se tuvo en cuenta la ubicación espacial de las muestras de vidrio dentro del background, estudiado también por [16]. Con los múltiples parámetros mencionados anteriormente se hace indispensable acotar el número de variables y tener en cuenta las que afectan directamente o en mayor proporción el modelo propuesto, por consiguiente, se clasificaron en dos grupos: parámetros controlados y parámetros variables. Dentro del primer grupo se encuentran las variables que fueron controladas y que permanecieron constantes durante las experimentaciones minimizando su incidencia sobre los resultados, en el segundo grupo están los parámetros variables, a los cuales se les realizaron cambios controlados durante las diferentes adquisiciones con el fin de conocer su incidencia y los cambios que producen en los valores de las imágenes de profundidad adquiridas, para obtener un modelo más simple y compacto. Los dos grupos de parámetros se aprecian en la Tabla 2, posteriormente se analizarán en detalle los parámetros mencionados en cada uno de los grupos.

Tabla 2 Clasificación los parámetros variables y controlados durante las experimentaciones

Parámetros Controlados	Parámetros Variables
Alineación de la cámara con respecto a las muestras de vidrio en (x, y)	Distancia de Adquisición de la cámara Kinect V2 a las muestras
Resolución de la cámara de profundidad	Geometría del Vidrio Transparente
Temperatura interna del Kinect V2	Espesor de las muestras de vidrio
Valor del pixel en función de la posición espacial	Desplazamiento espacial de las muestras
Múltiples reflexiones de la luz	
Luz externa indirecta	
Temperatura ambiente	

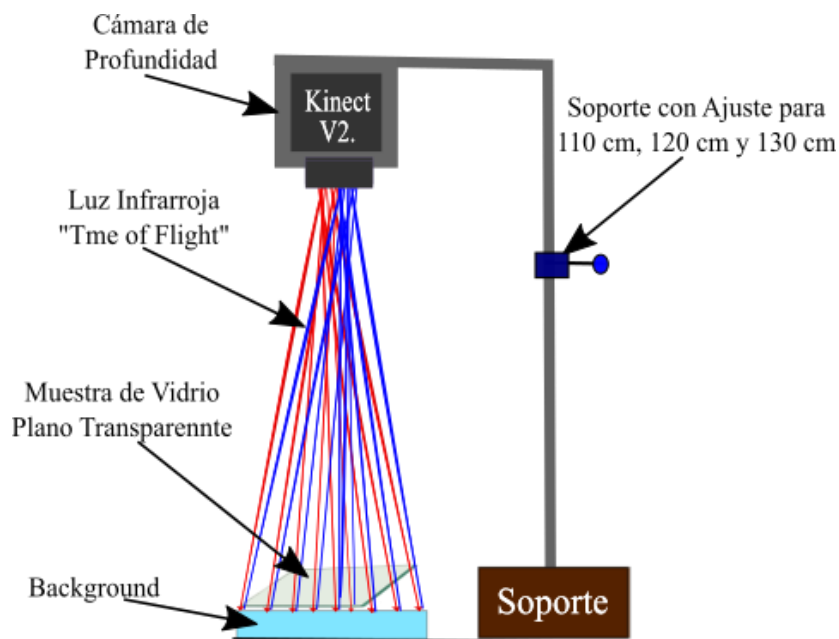


Figura 3-1 Diagrama esquemático del montaje experimental realizado para la adquisición de las imágenes RGBD

3.2 Parámetros controlados durante la adquisición

Debido a las múltiples variables que intervienen en el montaje experimental mencionadas anteriormente en la tabla 2, que pueden afectar los valores de profundidad obtenidos durante el proceso de adquisición, fue necesario mantener lo más estable posible algunos parámetros externos e internos para que no tuvieran una incidencia significativa en la medición del cambio de espesor en los contenedores de vidrio transparente, durante las adquisiciones de las imágenes RGBD y lograr un modelo simplificado. Es por esto que las variables que permanecen constantes se tratarán como parámetros controlados durante el proceso de adquisición, a continuación se describen detalladamente cada uno de estos parámetros.

3.2.1 Alineación de la cámara con respecto a las muestras de vidrio

Para el montaje experimental se utiliza un soporte robusto, el cual asegura la cámara Kinect con tornillos mariposa independientemente para cada desplazamiento de los ejes (x , y , z), lo que garantiza que no van a existir desplazamientos no deseados durante el proceso de adquisición de las imágenes RGBD; aunque se realizó una nivelación inicial manual con un nivel de gota en los ejes (x , y) de la cámara, buscando que estuviera en un plano paralelo a la superficie del background, es factible que exista un pequeño desnivel de la cámara con respecto a las muestras de vidrio en alguno de los dos ejes (x , y), pero como se verá en los siguientes capítulos al aplicar la técnica TOF a las imágenes de profundidad, donde la imagen del vidrio se resta con la imagen de referencia del background, esto garantiza que el

posible desnivel que exista entre las dos imágenes sea el mínimo, por lo tanto este parámetro se controlará pero no se tendrá en cuenta a la hora de realizar el modelo final.

3.2.2 Resolución de la cámara de profundidad del Kinect V2

Para la realización de las experimentaciones se utilizó la cámara de profundidad del Kinect V2, ésta proporciona una muy buena relación costo beneficio comparada con las diferentes cámaras del mercado, las limitaciones principales para la detección del cambio de espesor en la superficie de contenedores de vidrio transparente es la resolución de operación, la cual depende de algunas condiciones externas. Los estudios realizados por [33], a diferentes distancias 100 mm, 200 mm, 300 mm y 400 mm respectivamente sobre dos superficies inclinadas inicialmente a 45° y luego 60° , da como resultado una resolución por debajo de 2 mm para las distancias cercanas a 1000 mm de adquisición como se aprecia en la **figura 3-2** y con una desviación estándar cercana a 1 mm como se aprecia en la **figura 3-3**; aunque la resolución es un parámetro fijo por defecto de la cámara y no se puede cambiar, sí podemos optimizar las condiciones externas para garantizar que bajo un ambiente controlado se den los mejores resultados en la medición de la superficie del vidrio transparente con la cámara Kinect V2.

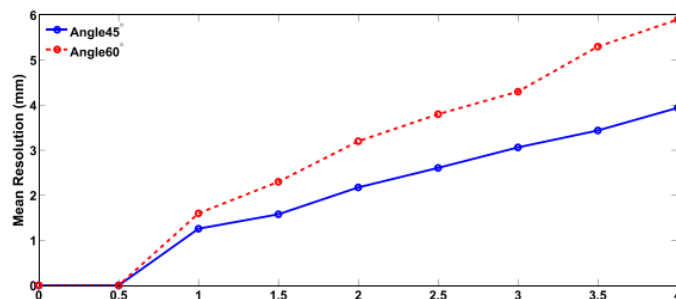


Figura 3-2 Resolución de la cámara Kinect V2 a diferentes distancias, fuente [33]

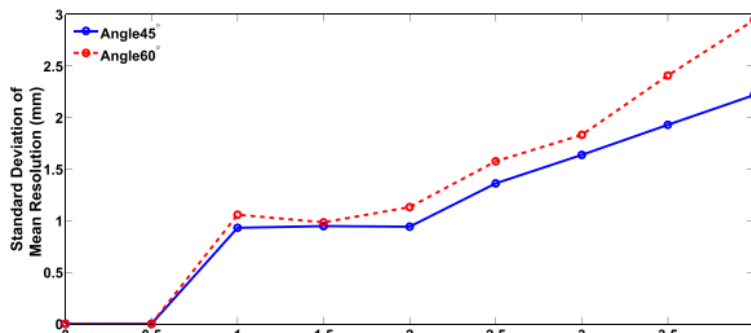


Figura 3-3 Desviación Estándar de la cámara Kinect V2 a diferentes distancias, fuente [33]

3.2.3 Variación por temperatura interna del Kinect V.2

El valor del pixel que indica la medida de profundidad en la imagen RGBD, puede variar progresivamente con el tiempo de operación continua de adquisición, debido al calentamiento interno generado por la electrónica de potencia propia de la cámara Kinect V2, aunque el Kinect está diseñado de fábrica para minimizar estos cambios de temperatura mediante un ventilador interno ubicado en la parte trasera, éste sólo prende después de un tiempo de trabajo continuo a partir de 20 minutos [34], a este tiempo no se tiene acceso externamente. Para mejorar el sistema de refrigeración y minimizar los cambios que se presentan en la temperatura interna, se instaló un ventilador externo en la parte posterior de la cámara Kinect, el ventilador permanece encendido todo el tiempo de adquisición de las imágenes de profundidad; el procedimiento para la adición del ventilador externo se realizó de manera similar a lo propuesto por [32], en la **figura 3-4** se aprecia la instalación del ventilador externo el cual se encuentra ubicado en el mismo sitio del ventilador original del Kinect V2. Con la adición de la ventilación forzada se logró estabilizar la temperatura interna y por consiguiente minimizar la variación de la medida durante las adquisiciones de imágenes en tiempos prolongados. Para cuantificar la mejora al adicionar el ventilador se realizaron dos adquisiciones: la primera se realizó con el Kinect con ventilación por defecto a un background plano ubicado a una distancia de 1200 mm, la segunda adquisición se realizó igualmente con el Kinect pero esta vez adicionándole una ventilación forzada y se realizó la misma adquisición al background inicial; para el análisis de los datos se realizó una gráfica comparativa del pixel central de la gráfica con los datos obtenidos en ambas adquisiciones, restándole el valor de profundidad inicial a todas las medidas con el fin de graficar solo las variaciones, por un periodo de once horas continuas. Como se aprecia en la en la **figura 3-5** se evidencia una variación en el valor de la profundidad del background con el tiempo de trabajo continuo con el Kinect original, mientras que los datos obtenidos con el Kinect V2 al instalar el ventilador permanente, se observa una mayor estabilidad en el promedio de la medida de profundidad, en el transcurso de las once horas de trabajo continuo que duraron las pruebas.

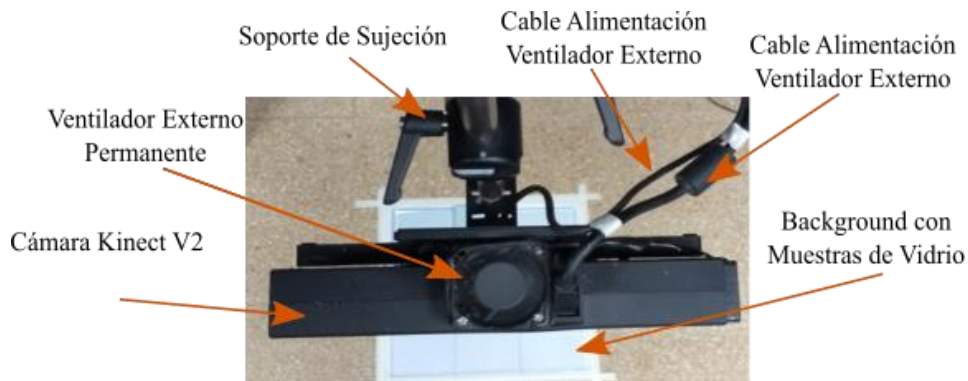


Figura 3-4 Instalación de ventilador externo de trabajo continuo, para disminuir la temperatura interna del Kinect V2

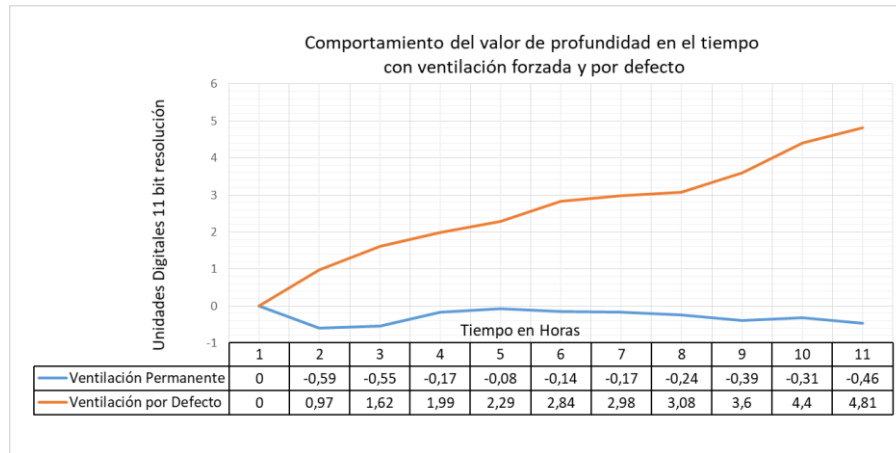


Figura 3-5 Comportamiento del Kinect v2 con ventilación forzada (grafica azul), en 11 horas de trabajo continuo

3.2.4 Variación por ubicación espacial de las muestras

Para disminuir el incremento en la desviación estándar en los píxeles que se alejan del centro de la imagen de profundidad debido a su ubicación espacial, se debe acotar el análisis de los datos de profundidad de las imágenes adquiridas y seleccionar los datos que se encuentren lo más cercano al centro del *field of view* de la cámara. Teniendo en cuenta que la resolución de profundidad del Kinect es de 512 x 424 píxeles, [13], [14], se seleccionó el área de análisis de los datos en las imágenes de profundidad con un tamaño de 140 x 140 píxeles. La variación en el valor del píxel de la imagen de profundidad de acuerdo a su posición espacial dentro de la imagen, ocurre debido al cono de luz infrarroja generada por la cámara Kinect para la adquisición, ésta no es homogénea dentro toda la escena completa, lo cual se puede comprobar con los píxeles de las esquinas (los más alejados del centro), que presentan más ruido que los píxeles centrales. En la en la **figura 3-6**, se aprecia (al lado derecho) la escala en color con el valor de la desviación estándar que representa cada píxel dentro de la imagen RGBD, y se evidencia que a medida que el píxel se aleja del centro el valor de la desviación en cada píxel aumenta, este fenómeno fue documentado por [32]; un análisis similar fue desarrollado por [33], en el cual se realizó una marcación de la zona de alcance de la luz infrarroja con la que cuenta la cámara de profundidad Kinect, el resultado obtenido fue similar: se identificó que a medida que un objeto ubicado dentro de la escena se va alejando del centro espacial, el promedio de la desviación estándar entregado en los datos de profundidad también comienza a aumentar.

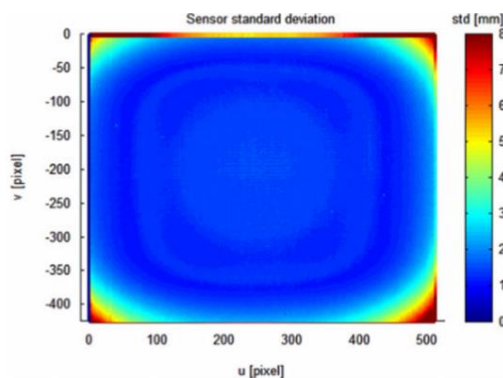


Figura 3-6 Imagen radial de la desviación estándar Vs valor del pixel, Fuente [32]

3.2.5 Variación por múltiples reflexiones de la luz

Otro parámetro que influye negativamente en el valor de los datos de las imágenes de profundidad, son los múltiples caminos que puede tomar la luz, conocidos como caminos ópticos, estos ocasionan que dos o más rayos de luz infrarroja lleguen a un mismo pixel dentro de la cámara, éste es un problema inherente a la adquisición de imágenes con técnicas TOF, por lo que se deben conocer para disminuir su incidencia. En la en la **figura 3-7**, se observa: a) una múltiple reflexión no deseada causada por la presencia de un objeto extraño, que se encuentra ubicado dentro del campo de visión y alcanza a generar una segunda señal de luz al ser reflejada por el mismo objeto, b) el caso más representativo para nuestro estudio, donde la luz infrarroja es refractada por el material transparente pero al mismo tiempo se genera una reflexión que se está sumando al mismo pixel con la luz que retorna luego de reflejarse en el background, este fenómeno no se puede eliminar completamente pero mediante una experimentación con condiciones controladas y con la ayuda de algunos filtros, que se explicaran más adelante, se logra minimizar este fenómeno que genera ruido en los datos entregados por las imágenes de profundidad. Finalmente en la figura 3-7 c) se observa otra de las causas que generan múltiples reflexiones, ésta ocurre cuando estamos adquiriendo la imagen de profundidad de un objeto que se encuentre cercano a las esquinas de una pared opaca, y se da debido a que el rayo infrarrojo se refleja en los bordes de las paredes y se refleja nuevamente en la cámara generando una doble medición en el mismo pixel, el análisis anterior fue desarrollado y explicado por [35]. En nuestro caso al adquirir las imágenes en la superficie del vidrio transparente también se generan varios caminos ópticos, debido a las reflexiones y refracciones propias de la luz en este tipo de material, las cuales no podemos eliminar pero sí podemos disminuir sus efectos, por esta razón el montaje experimental para la adquisición de las imágenes fue realizado en el laboratorio de óptica del ITM, que dispone de un espacio amplio para la ubicación de la cámara y de las muestras de vidrio, adicionalmente cuenta con paredes de color negro, con el propósito de eliminar las posibles reflexiones y prevenir este tipo de interferencias de múltiples caminos ópticos.

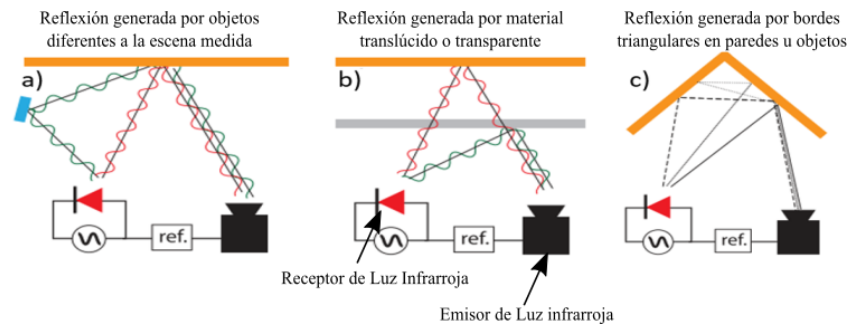


Figura 3-7 Diferentes factores que causan multiplex reflexiones en la adquisición, mediante la técnica “TOF”, fuente [35]

3.2.6 Variación por luz externa indirecta

Cuando se realizan adquisiciones de imágenes de profundidad con la cámara Kinect en lugares abiertos donde pueda haber presencia de luz solar, se presenta un factor adicional de interferencia en los datos de profundidad, debido a que la luz del sol genera componentes de luz en el rango cercano al del espectro infrarrojo de 860 nm, y estos se mezclan con la luz infrarroja emitida por la cámara de profundidad del Kinect dando lugar a ruido y al posterior aumento de error en la medición, este factor fue estudiado y documentado por [16]. En nuestro caso para evitar esta posible interferencia todas las experimentaciones se realizaron en el laboratorio de óptica y fotónica del ITM, en ausencia completa de luz externa, incluyendo las lámparas de tubos fluorescentes con las que cuenta la habitación, por consiguiente en el momento de realizar las adquisiciones de las imágenes de profundidad en la superficie de las muestras de vidrio transparente, se hizo a oscuras para garantizar la ausencia de cualquier otra luz externa que pudiera sumarse a la luz infrarroja proveniente de la cámara Kinect V2

3.2.7 Variación por la temperatura ambiente

Los cambios altos en la temperatura ambiente durante las experimentaciones pueden llegar a afectar negativamente la estabilidad y el valor de la medida de profundidad adquirida a las muestras de vidrio transparente, debido a que un incremento de la temperatura se sumaría a la temperatura interna propia de la electrónica de potencia de la cámara Kinect V2. La variación en las medidas generadas por las fuentes de calor fue analizada durante las adquisiciones en [16]. En este trabajo para disminuir la incidencia en las medidas por el cambio en la temperatura externa, todas las experimentaciones se realizan en el laboratorio de óptica del ITM, que cuenta con aire acondicionado permanente, y opera en un rango de temperatura estable y controlada a 23 °C.

3.3 Parámetros variables durante la adquisición de las imágenes

Para el segundo grupo de parámetros, a diferencia del primero, se seleccionaron las variables más relevantes para la adquisición de las imágenes de profundidad teniendo en cuenta que al variar la magnitud de éstas afectaban en mayor proporción los valores de profundidad obtenidos de las imágenes RGBD; para cuantificar los cambios que generan las variables analizadas en la medida de las imágenes de profundidad, se diseñaron varias experimentaciones donde se iban realizando algunos cambios de manera controlada a cada una de las variables por separado, una vez conocida su incidencia dentro del valor de las imágenes de profundidad, se relacionaron con los espesores de los vidrios transparentes y se plantearon dos modelos que describen el cambio de espesor en las placas de vidrio transparente planas y curvas, las variables tenidas en cuenta se describen a continuación.

3.3.1 Variación por la distancia de adquisición de la imagen RGBD

Para conocer la resolución práctica y real de la cámara Kinect V2 con la que se realizaron las diferentes experimentaciones de adquisición de imágenes de profundidad, y establecer un dato mínimo de la medida del espesor que se puede detectar inicialmente en un objeto opaco (no transparente), se realizaron tres adquisiciones a un background plano con un área fija de 450 mm x 450 mm, a diferentes distancias con respecto a la cámara de adquisición; las distancias seleccionadas variaron desde una mínima de 1100 mm, una distancia media de 1200 mm y una distancia máxima final de 1300 mm, el análisis se realizó tomando como referencia el valor del pixel central del background opaco sacado de las imágenes RGBD, los resultados obtenidos de estas experimentaciones se tabularon y se muestran en la **Tabla 3**. Allí se observa en la casilla de la izquierda la distancia de adquisición en milímetros seguida por el área total de background, el cual se encontraba ubicado en el centro espacial de adquisición de la cámara Kinect V2, luego en la columna del medio se encuentra el valor digital de profundidad del pixel central obtenido de la imagen de profundidad, en la casilla llamada resolución de profundidad se encuentra el valor que representa el valor mínimo en milímetros al cual se puede medir directamente con la cámara Kinect, para calcular este dato se divide el valor de profundidad entre la distancia de adquisición de la imagen (**ecuación 3-1**). Luego de efectuar los cálculos el valor obtenido para las tres distancias de adquisición fueron muy similares: 1.024 mm para la distancia de adquisición menor que fue de 1100 mm, 1.02 mm para la distancia de adquisición media 1200 mm y 1.016 mm para la distancia de adquisición mayor que fue de 1300 mm. Para evaluar qué tan diferentes eran los valores de los demás pixeles con respecto al pixel central en la superficie del background analizado, se evaluó el valor de la dispersión de todos los datos mediante desviación estándar, los resultados obtenidos se encuentran en la columna de la derecha de la tabla 3, y nos indica que existe una menor dispersión en los datos de profundidad con la distancia menor de adquisición (1100 mm). Una conclusión similar fue encontrada por [32], donde se evaluó

gráficamente la desviación estándar generada por el pixel central, variando la distancia de adquisición de las imágenes de 1000 mm hasta 4200 mm, llegando a la conclusión que después de 1100 mm, se obtenía una correspondencia lineal entre la distancia de adquisición y los valores de desviación estándar como se aprecia en la en la **figura 3-8**. Con los datos obtenidos se estableció la mínima distancia de adquisición de 1100 mm y la máxima de 1300 mm para realizar las experimentaciones posteriores.

$$R = \frac{V.D}{d} \quad 3-1$$

R = resolución experimental medida

V.D = valor digital entregado por el Kinect

d= distancia de adquisición de la imagen de profundidad

Tabla 3. Donde se relaciona la resolución y la desviación estándar con respecto a la distancia de adquisición de la imagen RGBD adquirida a un background opaco.

Distancia de adquisición en milímetros	Área del Background	Valor digital del pixel central	Resolución (unidad/mm)	Desviación Estándar
1100	450 x 450	1127	1,024	3,01
1200	450 x 450	1224	1,02	3,58
1300	450 x 450	1322	1,016	3,81

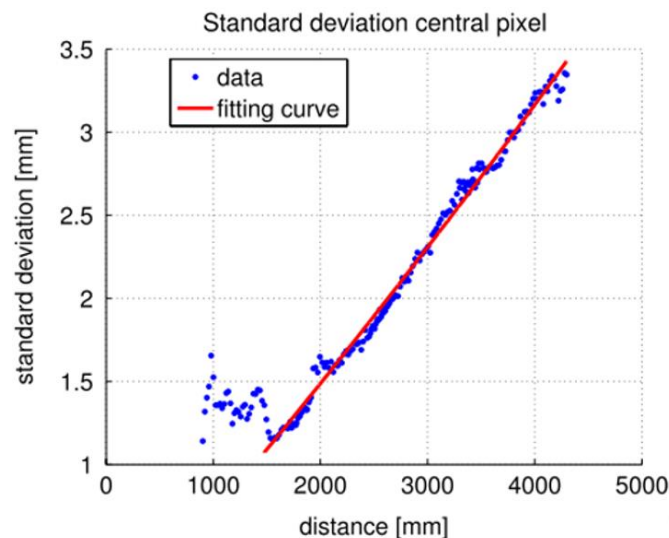


Figura 3-8 Relación lineal de la desviación estándar tomando el pixel central, con respecto a la distancia de adquisición de la imagen RGBD, Fuente [32]

3.3.2 Muestras de vidrio transparente planas y curvas

Para realizar las diferentes experimentaciones, se seleccionaron varias muestras de vidrio plano y curvo de una sola cara con diferentes características y espesores, en el caso de las muestras de vidrio plano transparente se utilizaron nueve piezas cuadradas con dimensiones de 140 mm x 140 mm, con diferentes espesores que comercialmente se consiguen en: 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm, 6 mm, 8 mm, 10 mm, 12 mm y 16 mm respectivamente como se aprecia en la **figura 3-9**. Para validar el espesor real de los vidrios se utilizó un instrumento de medición para diámetros exteriores conocido como calibrador pie de rey, en la validación de la medida de los espesores de 2 mm hasta 12 mm el valor coincidió exactamente con el calibrador, pero en el espesor de 16 mm, el calibrador marcó 15 mm como se aprecia en la **Figura 3-10**, por tal motivo los cálculos se hicieron con la medida real de 15 mm. En el segundo grupo de muestras se analizaron los vidrios con geometría redonda, aquí se tuvo el inconveniente que comercialmente no se consiguen vidrios curvos con diferentes espesores, por este motivo se optó por analizar las caras de los contenedores de vidrio curvo de productos alimenticios como el café, con tres tamaños diferentes: grandes, medianos y pequeños. En la **figura 3-11** se aprecia la superficie curva de una de las caras de los tres contenedores curvos con las respectivas medidas.

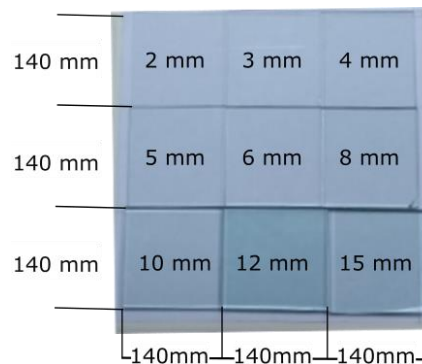


Figura 3-9 Superficie en vidrios planos transparentes con diferentes espesores

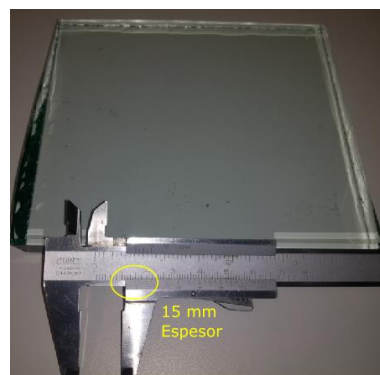


Figura 3-10 Vidrio plano comercialmente de 16 mm con medida real de 15 mm de espesor

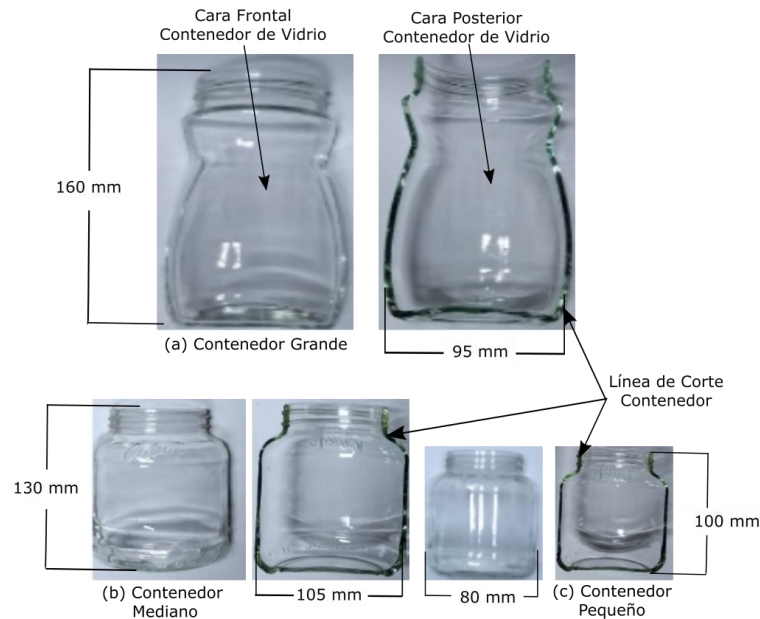


Figura 3-11 Superficie con geometría curva en una de las caras de los contenedores de vidrio transparente

3.3.3 Variación por la ubicación espacial de la muestra

Para conocer la variación en el valor de profundidad de las imágenes RGBD, causada por el desplazamiento espacial de las muestras de vidrio con respecto al campo de visión de la cámara Kinect V2, se dividió la superficie del background en forma de matriz con nueve partes iguales de 140 mm x 140 mm, y se procedió a marcar cada segmento comenzando con la primera fila y primera columna como A1, la segunda fila primera columna como B1 y la última fila primera columna C1, para las adquisiciones de las imágenes se hizo coincidir el centro espacial de la cámara Kinect con la división del cuadro central “B2” como se observa en la **figura 3-12**; posteriormente se ubicaron todas las muestras de vidrio plano transparente comenzando por el vidrio más delgado de 2 mm de espesor, el cual fue ubicado inicialmente en la posición A1, seguido por el de 3 mm en la posición A2 y así hasta completar los siete espesores restantes en los diferentes espacios de manera ascendente terminando con el vidrio de 15 mm en la posición C3. Luego se adquirieron 80 imágenes de profundidad de manera simultánea como se observa en la **figura 3-13 a**, a continuación se desplazaron cada una de las muestras una posición a la derecha **figura 3-12 b**, este procedimiento se realizó hasta que cada muestra de vidrio pasara por cada una de las diferentes posiciones como se muestra en la **en la figura 3-13 c**; en cada una de las posiciones se adquirieron las mismas 80 imágenes simultáneas. El procedimiento anterior se repitió de la misma manera para las tres distancias de adquisición programadas de 1100 mm, 1200 mm y 1300 mm.

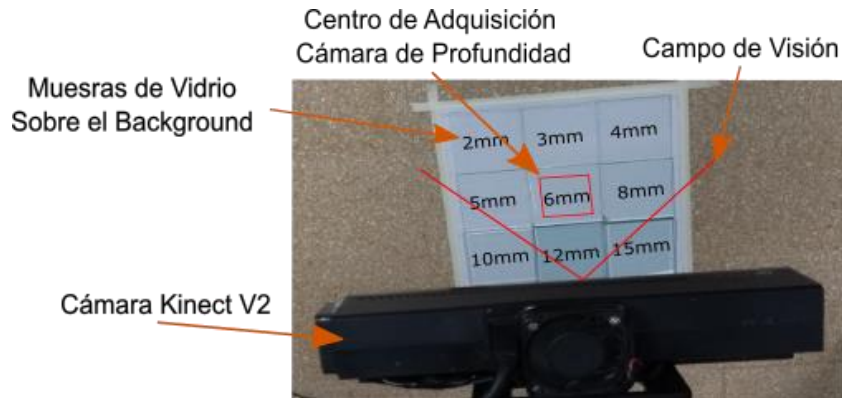


Figura 3-12 División del background, para la ubicación espacial y la rotación de las nueve placas de vidrio plano transparente

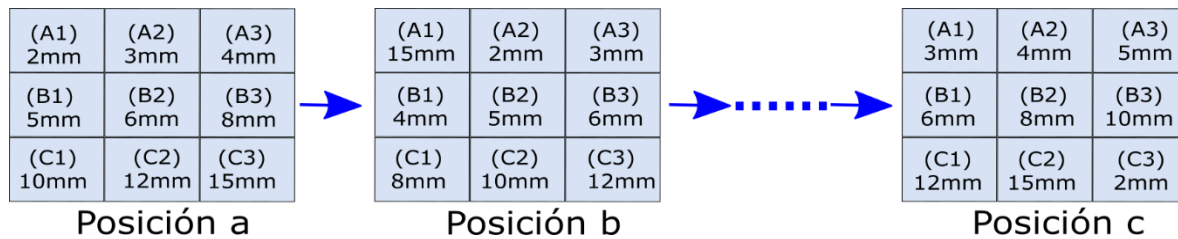


Figura 3-13 Adquisición de imágenes en vidrio plano transparente con diferentes ubicaciones espaciales dentro de la división del background

3.3.4 Preprocesamiento de las imágenes de profundidad

Las imágenes de profundidad adquiridas individualmente con el Kinect V2, pueden presentar ruido como sal y pimienta lo cual es inherente al sensor y a la tecnología utilizada TOF, también puede presentar múltiples reflexiones (camino óptico de la luz infrarroja) debido a los fenómenos de refracción y reflexión de la luz en las muestras de vidrios transparentes, este inconveniente se puede minimizar realizando el promedio de las imágenes adquiridas simultáneamente. En [43] se realizó un estudio estadístico con 20, 50, 100 y 200 imágenes de profundidad adquiridas simultáneamente cada 500 ms a la misma escena, en una pared plana separada 1150 mm de la cámara Kinect, las mediciones se realizaron en un área central de 3 x 3 píxeles (nueve píxeles en total), similar al área mínima seleccionada en este trabajo para el análisis de todas las muestras experimentales. En la **en la figura 3-14** se muestra el resultado obtenido con 100 mediciones sucesivas, la línea en rojo muestra la desviación estándar calculada con los datos obtenidos dando como resultado una desviación inferior a 1 mm, el trabajo resalta que aproximadamente después de 50 muestras promediadas, los cambios en los valores obtenidos no sufren variaciones significativas.

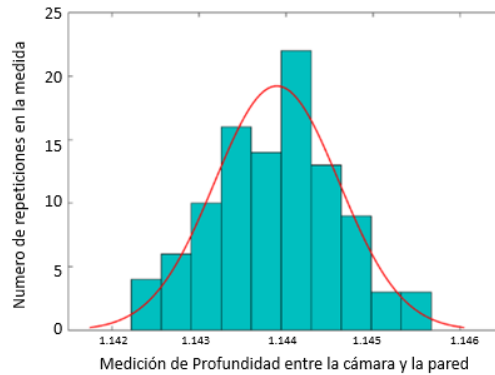


Figura 3-14 Valor de profundidad de 100 datos, a una pared plana ubicada a 1150 mm de distancia, la línea roja representa la desviación estándar. Fuente [34]

Similar a [10] se adquirieron ochenta imágenes de profundidad continuas a las muestras de vidrio, posteriormente se les realizó el preprocesamiento utilizando la función de *Average image* (disponible en la librería de visión artificial instalada con el software de visión de *Labview*), el resultado luego de aplicar este filtro es una sola imagen RGBD que promedia las 80 imágenes iniciales. Luego esta imagen se pasó por un segundo filtro de *Median Image*[36], con el objetivo de suavizar los bordes en la imagen de profundidad generado por las diferentes muestras de vidrio transparente, y para minimizar los posibles datos de profundidad que la cámara no alcanza a definir con un valor concreto y en su defecto coloca cero (sin valor de profundidad), lo que se presenta como puntos negros dentro de la imagen adquirida; estos datos de profundidad sin valor se dan principalmente debido al ángulo de incidencia de la luz infrarroja dentro del vidrio, causado por las múltiples reflexiones y refracciones en la superficie del vidrio transparente analizado en [37]. Este procedimiento se repitió tanto para las imágenes del background como para las imágenes RGBD adquiridas en las diferentes muestras de vidrio transparente en cada una de las posiciones de adquisición. En la **en la figura 3-15 a**, se observan las ochenta imágenes de profundidad adquiridas simultáneamente con la cámara Kinect a la superficie del background y en la **en la figura 3-15 b**, se observa la imagen de profundidad del background después de aplicar los dos filtros, de igual manera se muestra en la **en la figura 3-16 a**, la adquisición de las ochenta imágenes de profundidad de los vidrios planos transparentes, y en **figura 3-16 b** se observa la imagen de profundidad resultante después de los filtros. Este procedimiento se aplicó a todas las adquisiciones realizadas con el Kinect V2.

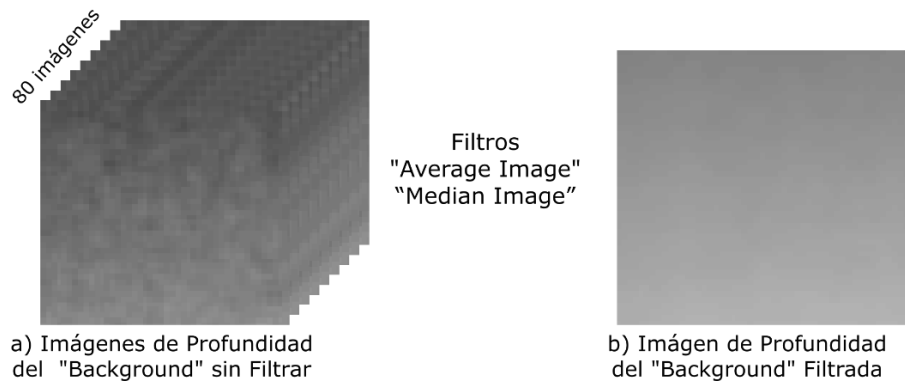


Figura 3-15 Imágenes de profundidad adquirida de los vidrios planos con diferentes espesores, antes y después de utilizar los filtros

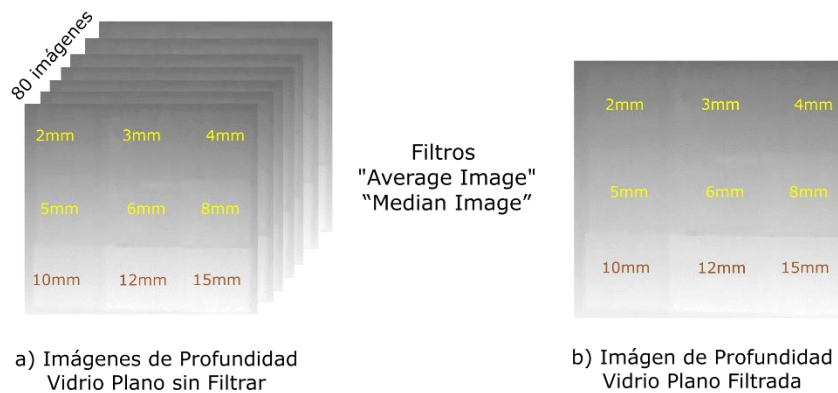


Figura 3-16 Imágenes de profundidad adquirida del background antes y después de utilizar los filtros

3.3.5 Adquisición simple de imágenes de profundidad en superficies de vidrio plano transparente

Para la adquisición de las imágenes de profundidad con el método simple, se utilizaron nueve placas cuadradas de vidrio plano transparente cada uno con un tamaño de 140 mm x 140 mm y con diferentes espesores: 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm, 6 mm, 8 mm, 10 mm, 12 mm y 15 mm respectivamente, en el montaje físico se ubicó la cámara Kinect V2 paralela a la superficie del background a una distancia inicial de 1100 mm, medida desde la superficie de la cámara de profundidad hasta la superficie del background, y luego se procedió a la adquisición continua de las ochenta imágenes de profundidad, comenzando en la posición "A1" con el vidrio de 2 mm y finalizando en la posición "C3" con el vidrio de 15 mm, las adquisiciones se repitieron ocho veces más desplazando cada muestra de vidrio una posición dentro del background, hasta garantizar que cada muestra de vidrio plano transparente con diferente espesor pasara entre las diferentes posiciones espaciales del background. Este procedimiento de adquisición se realizó igualmente con las dos distancias restantes de 1200 mm y 1300 mm ajustando el montaje inicial para cada distancia. En la **en la figura 3-17**, se

observan las nueve imágenes de profundidad resultantes después del filtrado, donde cada espesor de vidrio plano transparente pasó por cada una de las ubicaciones espaciales diferentes dentro del background



Figura 3-17 Imágenes de profundidad filtradas de las muestras de vidrios planos transparente a una distancia de 1100 mm

3.3.6 Adquisición simple de imágenes de profundidad en superficies de vidrio curvo transparente

Para la detección del cambio de espesor en la superficie de contenedores de vidrio transparente con superficies curvas, al igual que con las muestras de vidrios planas, se dispuso de una sola cara del contenedor ya que el método TOF (utilizado para determinar el espesor), se compone de un haz de luz infrarroja que atraviesa completamente la pared del vidrio, se refleja en una superficie opaca y luego regresa nuevamente por el vidrio hasta la cámara. Para realizar la adquisición de las imágenes de profundidad en los contenedores de vidrio con superficie curva con el método simple, se procedió a diseñar un background especial con la forma física de la superficie del contenedor que se quiere analizar. En la **en la figura 3-18 a** se observa el diseño del background de un contenedor con forma curva de tamaño grande, en la **en la figura 3-18 b**, se encuentra el background del contenedor con forma curva tamaño mediano y por último la **en la figura 3-18 c**, muestra el background con forma de contenedor curvo tamaño pequeño. Para la adquisición simple se ubicó la cámara Kinect V2 paralela a la superficie del background, y se procedió con las ochenta

adquisiciones de imágenes de profundidad simultáneas, inicialmente al background solo y luego colocando las muestras de vidrio sobre el background. En la **en la figura 3-19 a**, se observan las ochenta imágenes de profundidad adquiridas simultáneamente de la superficie del contenedor curvo pequeño, y en la **en la figura 3-19 b** la imagen resultante después de aplicar los dos filtrados “Average image” y “Median Image”. Este mismo procedimiento se realizó con los contenedores curvos mediano y grande, con las tres distancias de adquisición de 1100 mm 1200 mm y 1300 mm.

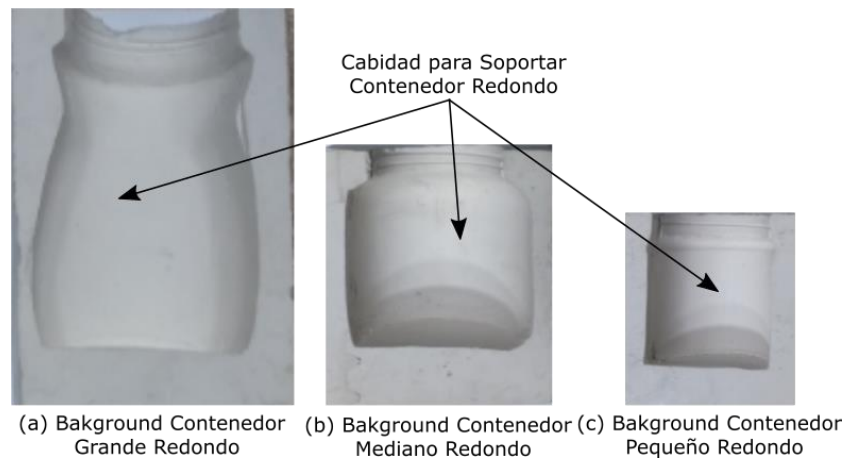


Figura 3-18 Imágenes de profundidad adquirida del contenedor de geometría curva, antes y después de utilizar los filtros

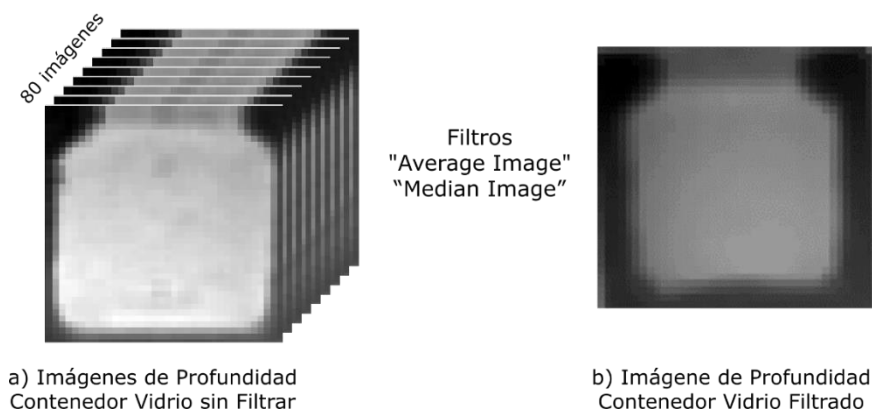


Figura 3-19 Background con concavidad curva diseñado para contenedores de superficie redonda con diferentes tamaños

3.4 Adquisición compuesta de imágenes de profundidad

Con las especificaciones técnicas del Kinect V2 [11], [14] y con las limitaciones físicas obtenidas, se tiene que la resolución del Kinect sólo permite la detección de profundidad en objetos opacos de unos pocos milímetros, lo cual fue el principal inconveniente cuando se

realizaron las pruebas con las piezas de vidrio transparente, pues en este tipo de material por su composición física presentaba mayor interferencia durante la adquisición de las imágenes de profundidad [38]. Cuando se obtiene una imagen de profundidad sobre una superficie translúcida, la refracción de los rayos de luz al atravesar las paredes del objeto, genera una distorsión dando la sensación de que la muestra se encuentra en una posición más lejana de la real, lo cual fue documentado por [39], [40] y [45]. Con base en esta observación se realizó una segunda experimentación llamada adquisición compuesta, bajo las mismas condiciones de distancias y a los mismos vidrios transparentes planos y curvos de las adquisiciones anteriores, la diferencia consistió en reemplazar la imagen de profundidad del background (referencia), por la imagen de profundidad generada de una muestra de contenedor opaco (no transparente), los cuales contaban con las mismas dimensiones de 140 mm x 140 mm e igualmente con los mismos espesores de las muestras de vidrio analizadas; con esto se logró aumentar la diferencia en magnitud entre la superficie de la muestra de vidrio aparente con respecto a la imagen de profundidad de la muestra opaca, como se aprecia en la **figura 3-20**, donde se observa el aparente aumento en la distancia de la superficie del vidrio con respecto a la superficie real del vidrio.

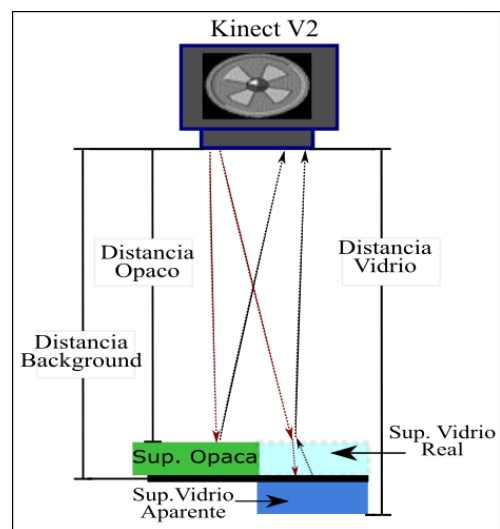


Figura 3-20 Distancia real en la superficie de la pieza opaca Vs la distancia aparente en la superficie de la pieza de vidrio transparente

3.4.1 Adquisición compuesta de imágenes de profundidad en superficies de vidrio plano transparente

El montaje experimental desarrollado para la adquisición compuesta de las imágenes de profundidad en las muestras de vidrio transparente fue similar al realizado en la adquisición simple, la principal diferencia consistió en reemplazar la imagen del background por la de las muestras con superficie opaca, las experimentaciones se realizaron con los mismos espesores de 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm, 6 mm, 8 mm, 10 mm, 12 mm y 15 mm. En la **figura**

3-21 a, se observa la adquisición inicial de las ochenta imágenes de profundidad simultáneas a las muestras opacas con diferentes espesores a una distancia inicial de 1100 mm, y en la **figura 3-21 b**, se encuentra la imagen resultante luego de aplicar los filtros “Average Image” y “Median Image”, igualmente para conocer la variación de profundidad debido a la ubicación espacial de las muestras opacas, se realizaron diferentes adquisiciones rotando las muestras hacia la izquierda hasta garantizar que cada espesor pasara por las diferentes posiciones espaciales, similar a lo realizado con las muestras de vidrio en la adquisición simple. En la **figura 3-22** se observan las nueve imágenes resultantes después de realizar las adquisiciones simultáneas y el respectivo filtrado de las muestras opacas, este procedimiento se de adquisición se repitió con las dos distancias restantes de 1200 mm y 1300 mm.

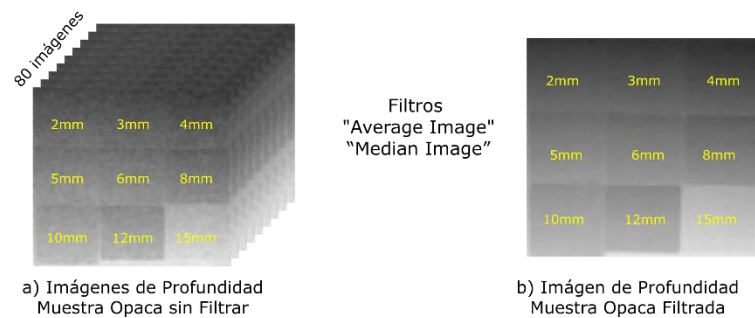


Figura 3-21 Imágenes de profundidad adquirida de las muestras opacas con diferentes espesores, después de utilizar los filtros



Figura 3-22 Imagen de profundidad adquiridas a las nueve muestras de color paco en diferentes ubicaciones espaciales antes y después de utilizar los filtros

3.4.2 Adquisición compuesta de imágenes de profundidad en superficies de vidrio curvo transparente

La adquisición compuesta de las imágenes de profundidad en la superficie de vidrio curvo transparente se realizó bajo las mismas condiciones, distancias y a los mismos vidrios curvos transparentes de la adquisición simple, la diferencia consistió en reemplazar la imagen de profundidad del background (referencia), por imágenes de profundidad generadas por las muestras de color opaco, estas contaban con las mismas dimensiones en tamaño y en forma de los contenedores de vidrio transparente. En la **figura 3-23 a** se observa la muestra opaca del contenedor grande, en la **figura 3-23 b** se encuentra la muestra opaca del contenedor mediano y por último se encuentra el contenedor opaco curvo pequeño **figura 3-23 c**. Las adquisiciones de las imágenes también se realizaron con las tres distancias de 1100 mm, 1200 mm y 1300 mm respectivamente.

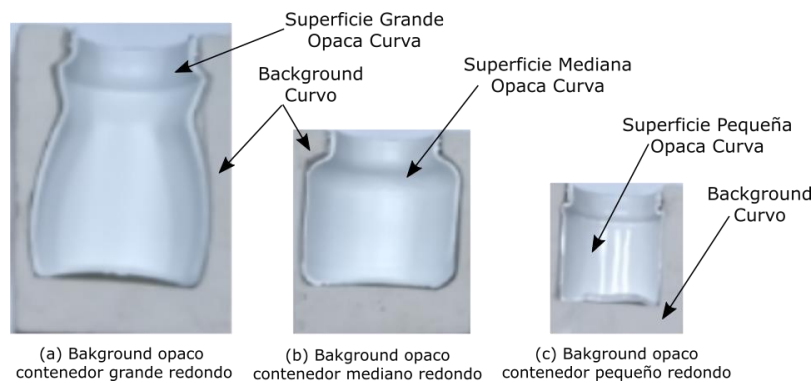


Figura 3-23 Contenedores de color opaco con superficie redonda, con diferentes tamaños

Una vez adquiridas las ochenta imágenes de profundidad de cada una de las muestras opacas curvas grande, mediana y pequeña, se procedió a aplicar los filtros “Average image” y “Median Image”, como se aprecia en la **figura 3-24 a** y luego en la **figura 3-24 b** donde se observa la imagen resultante, este procedimiento también se realizó variando la distancia de 1100 mm, 1200 mm y 1300 mm.

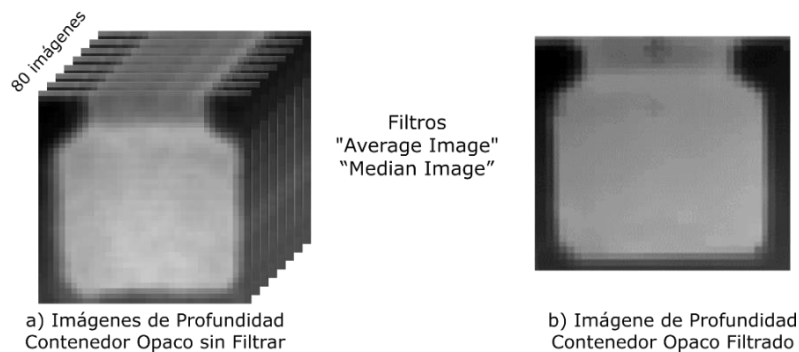


Figura 3-24 Imágenes de profundidad adquirida del contenedor de geometría curva, antes y después de utilizar los filtros

3.5 Análisis de resultados

Para mejorar la estabilidad en la medida durante las adquisiciones de las imágenes de profundidad de los contenedores de vidrio transparente, fue necesario mejorar el sistema de refrigeración del Kinect V2, adicionando un ventilador externo permanente, similar a lo realizado por [32].

Para minimizar las posibles variaciones en los valores de profundidad del Kinect V2 durante las adquisiciones de las imágenes de profundidad debido a variables externas, las experimentaciones se realizaron en un cuarto especial, con paredes negras para evitar al máximo las reflexiones de luz, con temperatura estable de 23° Celsius, y aislado de cualquier luz externa (solar, lámparas), todas las adquisiciones se realizaron en ausencia completa de luz externa.

Para el cumplimiento del objetivo uno y realizar las adquisiciones de las imágenes de profundidad con la cámara Kinect v2 en los contenedores de vidrio transparente, fue necesario dividir los parámetros que afectaban de alguna manera la adquisición de las imágenes, como parámetros constantes y parámetros variables como se muestra en la tabla 2, con el fin de obtener un modelo compacto y proponer una metodología práctica para la detección del cambio de espesor

Con los datos obtenidos de la Tabla 3, se establece que la resolución mínima para la detección de espesor hallada experimentalmente en superficies opacas es de 1.1 mm, esta resolución permanece muy similar con las distancias de adquisición de 1100 mm, 1200 mm y 1300 mm, mientras que para las adquisiciones de profundidad en superficies de vidrio transparente la resolución aumenta en varios milímetros dependiendo del espesor del vidrio analizado; para corregir esta dificultad y mejorar la resolución en las imágenes empleadas para la detección del cambio de espesor, se implementó la adquisición compuesta como se explica con la figura 3-20.

Por medio del software de programación Labview y su librería de visión artificial, se implementaron dos filtros “Average image” y “Median Image” [36], los cuales permitieron mejorar la imagen de profundidad de los ruidos inherentes a la adquisición de las imágenes de profundidad, en superficies de vidrio transparente mediante la cámara Kinect V2.

4. Modelos propuestos para la detección del cambio de espesor en contenedores de vidrio transparente

En este capítulo se analizaron las imágenes de profundidad adquiridas y filtradas en el capítulo anterior, por medio de dos metodologías propuestas que contienen modelos lineales que correlacionan los datos de profundidad obtenidos de las diferentes imágenes con el espesor en cada muestra de vidrio transparente en un área extendida de la superficie. El procedimiento experimental empleado para las dos metodologías fue muy similar, la diferencia principal se encuentra en la forma de hallar el valor digital de la distorsión producida por el material transparente. En el primer procedimiento (metodología simple) se obtuvo la diferencia del valor de profundidad de las muestras de vidrio con respecto al background, mientras que para el segundo procedimiento (metodología compuesta) se realizó la diferencia de las muestras de vidrio pero con respecto a las muestras de un material opaco, lo que dio como resultado una mejora en la resolución. El objetivo de este capítulo es proponer dos modelos el primero con base en la metodología simple y el segundo en la metodología compuesta.

4.1 Metodología simple para la detección del cambio de espesor en la superficie del vidrio

La metodología simple propuesta para la detección del cambio de espesor en contenedores de vidrio transparente se aprecia en la **Figura: 4-1**, en el recuadro de color verde se observan los pasos que se deben seguir para la detección del cambio de espesor en la superficie del vidrio, y en el recuadro de color rojo los pasos adicionales para hallar el modelo simple teniendo en cuenta las variables que afectan la medida de profundidad como son la ubicación espacial de la muestra con respecto al campo de visión de la cámara, y la distancia a la cual se realizó la adquisición de las imágenes de profundidad (vistas en el capítulo anterior). A continuación, se detallan los pasos para hallar el modelo simple.

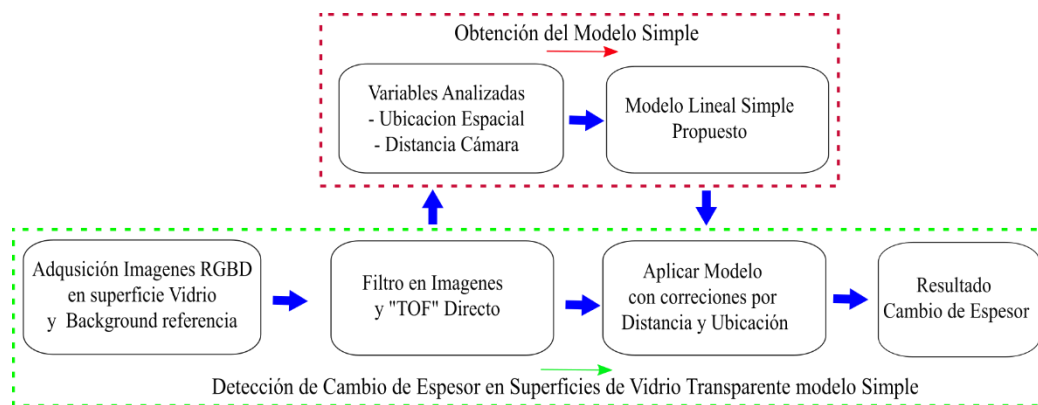


Figura: 4-1 Metodología simple propuesta para la detección del cambio de espesor en la superficie de vidrio transparente

4.1.1 Procedimiento para analizar las imágenes mediante “TOF” para el modelo simple

Para hallar el valor digital causado por la distorsión del vidrio transparente en las imágenes de profundidad, para el modelo simple se realizó la diferencia aritmética entre la imagen de profundidad del background y la imagen de las muestras de vidrio con diferentes espesores. En la figura 4-2 a, se observa la imagen de profundidad adquirida a los nueve vidrios planos transparentes que se encontraban sobre el background, en la figura 4-2 b se encuentra la imagen del background sola sin ninguna interferencia, y en la figura 4-2 c se encuentra la imagen con la diferencia aritmética de las dos imágenes de profundidad anteriores, esta nueva imagen contiene sólo el valor digital del espesor de la superficie de los vidrios planos analizados; los valores de esta imagen están en unidades digitales con una resolución de once bit como se menciona en [13].

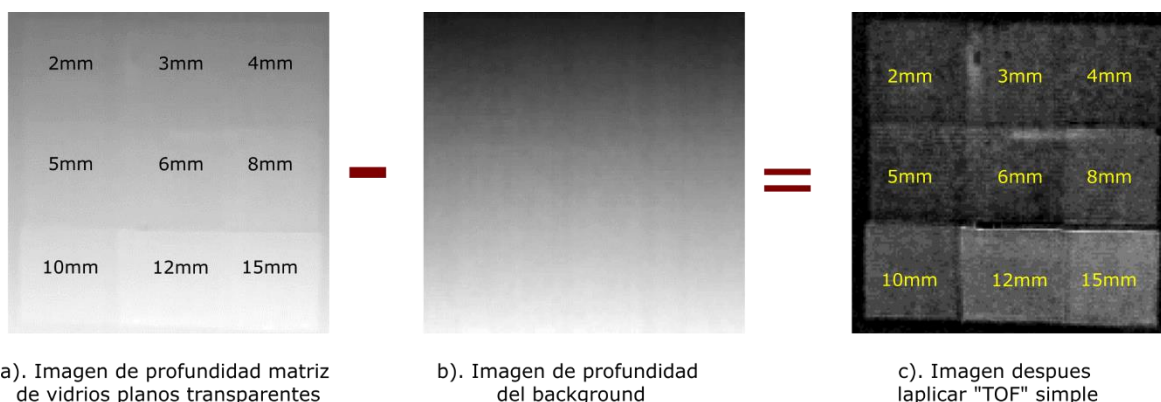


Figura: 4-2 Aplicación de la técnica “TOF” simple en la superficie de la matriz de vidrios planos con diferentes espesores

Para conocer los cambios en los valores de profundidad que se presentan al cambiar de posición espacial las muestras de vidrio con respecto al campo de visión de la cámara, se rotaron las muestras de vidrio una posición como se muestra en la **figura 4-3 a**, donde se observa el valor de profundidad resultante de los diferentes espesores después de aplicar la diferencia; se inicia con el vidrio de 2 mm en la posición izquierda superior A1, luego en la **figura 4-3 b** se realiza el primer desplazamiento hacia la izquierda, este mismo procedimiento se repitió hasta llegar a la posición que se aprecia en la **figura 4-3 i**, garantizando que cada muestra haya pasado por todas las posiciones espaciales dentro del background.

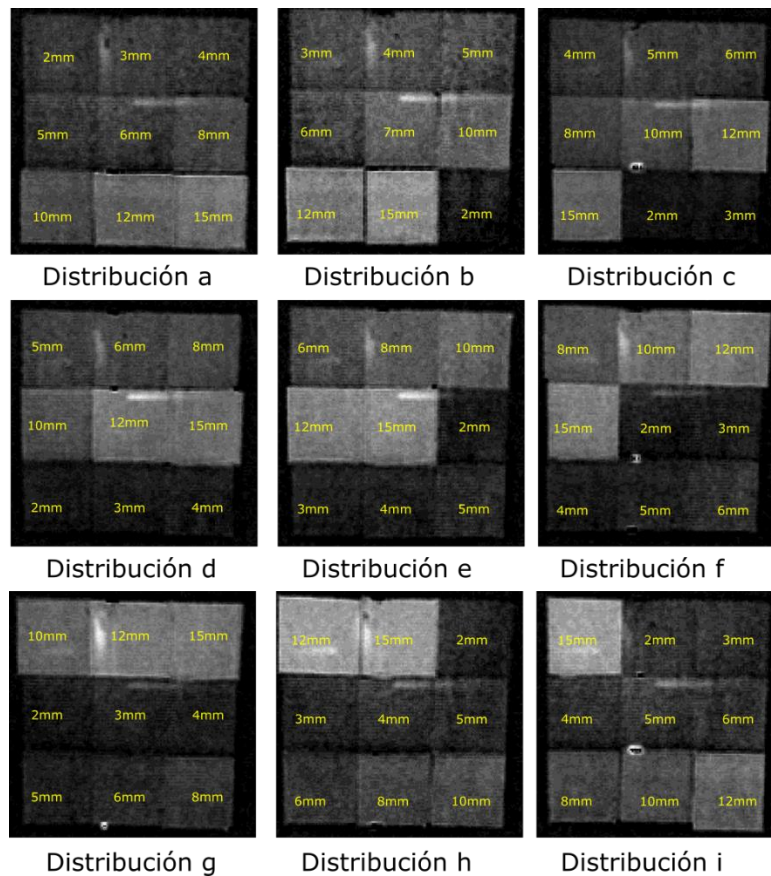


Figura: 4-3 Imágenes con los valores digitales resultante después de la diferencia con el background, técnica “TOF” simple

Luego de obtener los valores digitales correspondientes a cada posición espacial, se reorganizan las muestras de tal manera que el valor digital del vidrio de 2 mm se muestre en cada posición diferente de la imagen resultante, luego se realiza el mismo procedimiento con los demás espesores de vidrio de 3 mm iniciando con el espesor de 2 mm y finalizando con el espesor de 15 mm, como se aprecia en la **figura 4-4 a**. Para el posterior análisis de los datos se dividen todas las imágenes en subgrupos de 3 x 3 pixeles, similar a lo realizado por [34], el resultado de esta operación se muestra en la **figura 4-4 b**, el valor digital promedio obtenido de la subdivisión anterior se observa en la **figura 5**, esta matriz resultante se dividió a su vez en nueve partes iguales comenzando en la parte superior con A1, A2 y A3, en la parte central se encuentra B1, B2 y B3 y por último en la parte inferior están C1, C2 y C3 esto con el fin de realizar los análisis y comparaciones de los datos de cada posición espacial diferente.

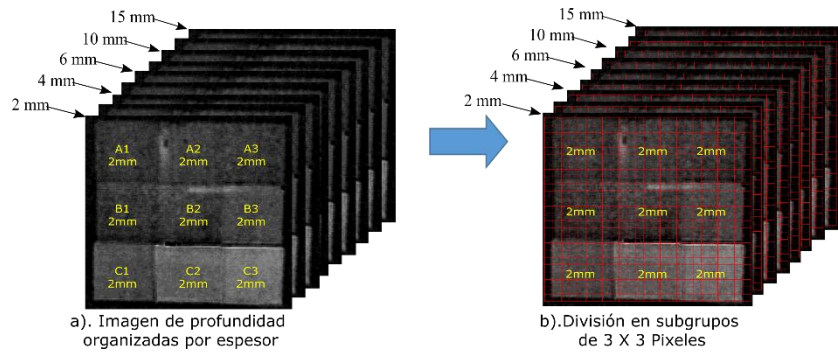


Figura: 4-4 Promedio de los valores de profundidad agrupados por espesores para el modelo simple

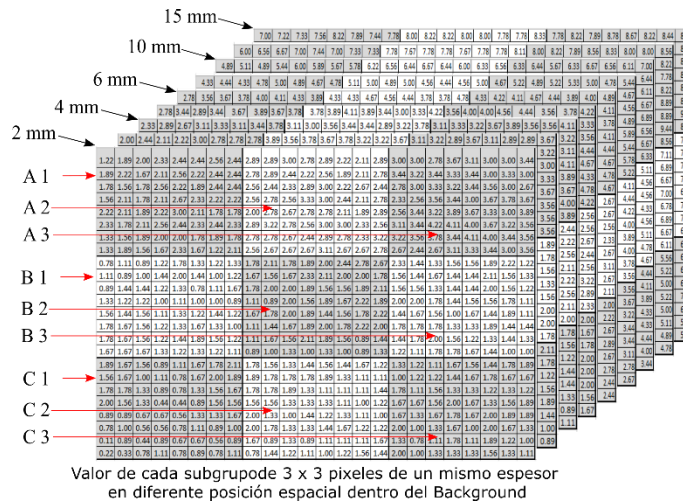


Figura: 4-5 Organización por espesores y división en subgrupos de 3 x 3 pixeles, para el modelo simple

4.1.2 Cambio en el valor de profundidad variando la posición espacial de las muestras para el modelo simple

Para analizar la incidencia que tiene el desplazamiento espacial en las muestras de vidrio plano transparente con respecto al campo de visión de la cámara de profundidad Kinect, se tomó el pixel central en cada subregión de la matriz de datos obtenida en la **figura 4-5**, y se realizó una gráfica donde en el eje de las abscisas se ubicaron las posiciones espaciales desde A1 hasta C3 (en la que se dividió la de la matriz), y en las ordenadas se ubicó el valor de profundidad que corresponde a cada ubicación en unidades digitales de once bits representados en una escala de 0 a 10 como se aprecia en la **figura 4-6** cada color representa un espesor diferente marcado en la parte inferior izquierda, de azul claro se encuentra el vidrio de 2 mm que cambia en más de dos unidades en el eje de las ordenadas mientras se desplaza por cada ubicación dentro del background, esto hace que sea difícil identificar con esta metodología simple espesores en vidrios con diferencias entre 2 mm o 3 mm. En la parte

superior de color café se encuentra representado el vidrio con espesor de 15 mm que también presenta diferencia hasta de 3 unidades en las diferentes ubicaciones dentro del background.

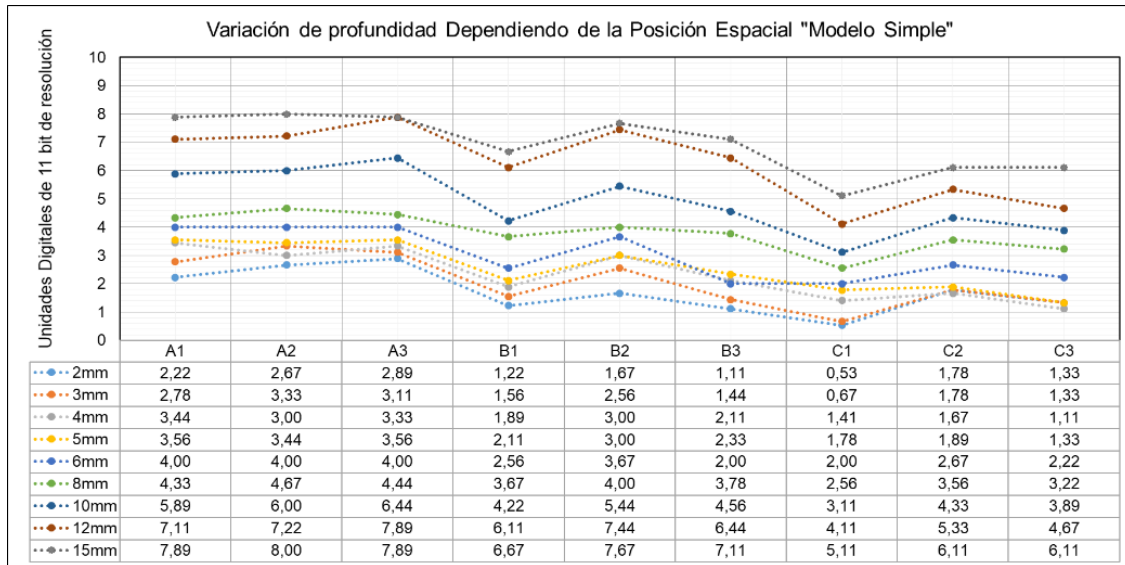


Figura: 4-6 Valor de profundidad de las muestras de vidrio plano transparente con respecto a la posición espacial dentro del background en el modelo simple

Posteriormente, con los mismos datos se realizó una gráfica de color radial tomando como referencia la posición central del *background* “B2”, y se realizó la diferencia aritmética con respecto a cada posición vecina en grados como se muestra en la **figura 4-7**, donde se observa que las posiciones inferiores C1, C2 y C3 presentan la mayor variación en el valor digital de profundidad con respecto a la posición central B2, esto puede ser debido a una incidencia diferente en el ángulo de luz infrarroja por la ubicación espacial de la muestra, o a una posible inclinación de la cámara con respecto al background al momento de realizar la adquisición de la imagen.

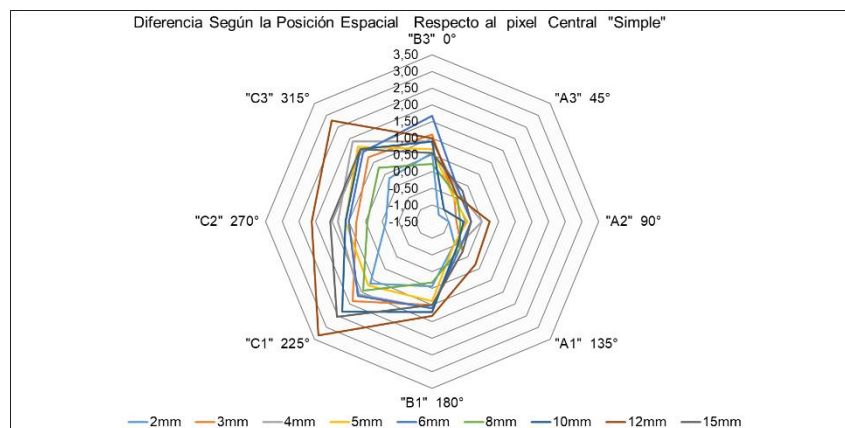


Figura: 4-7 Gráfica radial, con la diferencia del pixel central “B2” las demás posiciones espaciales dentro del background, en el modelo simple

4.1.3 Cambio en el valor de profundidad variando el espesor de las muestras para el modelo simple

El cambio de espesor es la variable más relevante dentro del análisis realizado a las diferentes muestras de vidrio plano transparente, en la **figura 4-8**, se observa la gráfica que corresponde a los valores digitales obtenidos para cada espesor diferente del pixel central en cada subregión, comenzando con A1 hasta llegar a C3, estos datos se ubicaron en el eje de las abscisas, en el eje de las ordenadas se ubicó el valor de profundidad en unidades digitales representados en una escala de 0 a 10, en esta grafica se evidencia la variación de hasta 4 unidades que presenta cada medida de espesor al cambiar la ubicación espacial dentro del background

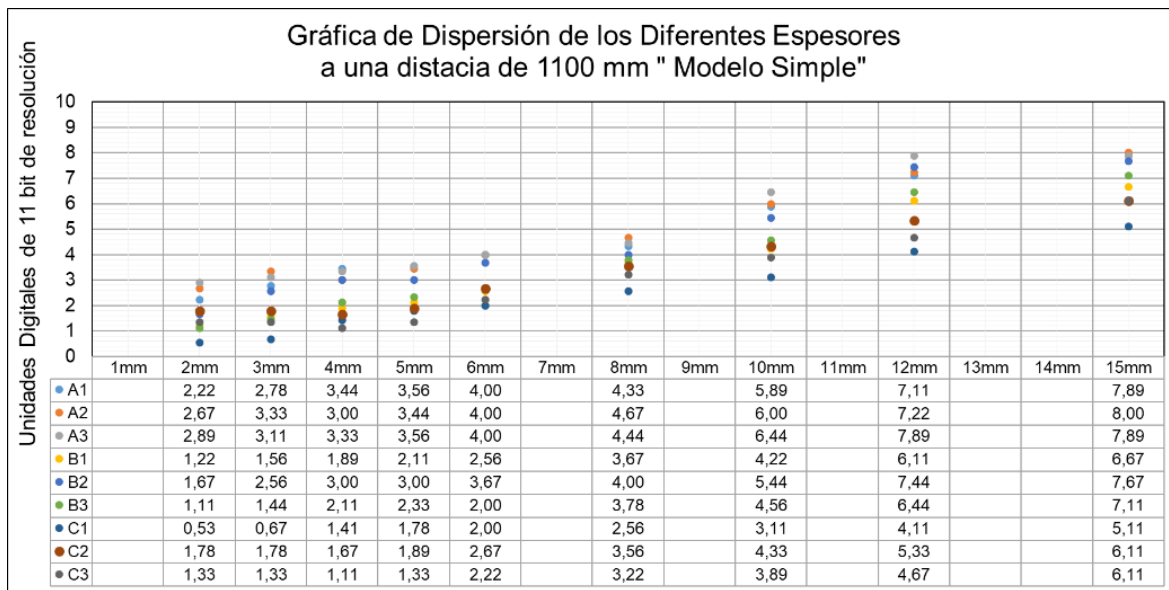


Figura: 4-8 Valor de profundidad de las muestras de vidrio con respecto al cambio de espesor, en las diferentes posiciones espaciales del modelo simple

Luego se halla una función polinómica de primer orden que representa, mediante una función lineal, la tendencia que experimentan los datos de profundidad de las imágenes RGBD al cambiar los valores del espesor en las muestras de vidrio transparente estando en una misma posición dentro del background, este procedimiento se realizó para las tres distancias diferentes de adquisición. En la **figura 4-9** se muestra en las abscisas el valor en milímetros de los diferentes espesores ubicados en el pixel central posición B2 del background, y en el eje de las ordenadas se encuentra el valor digital obtenido luego de aplicar la técnica "TOF" simple, la línea de tendencia roja corresponde a la adquisición realizada a 1100 mm de distancia, la línea de tendencia azul corresponde a 1200 mm de distancia y la línea de tendencia verde es la adquisición a 1300 mm de distancia; en el lado izquierdo de la gráfica se encuentran los diferentes modelos lineales hallados, que representan una función diferente para cada distancia de adquisición.

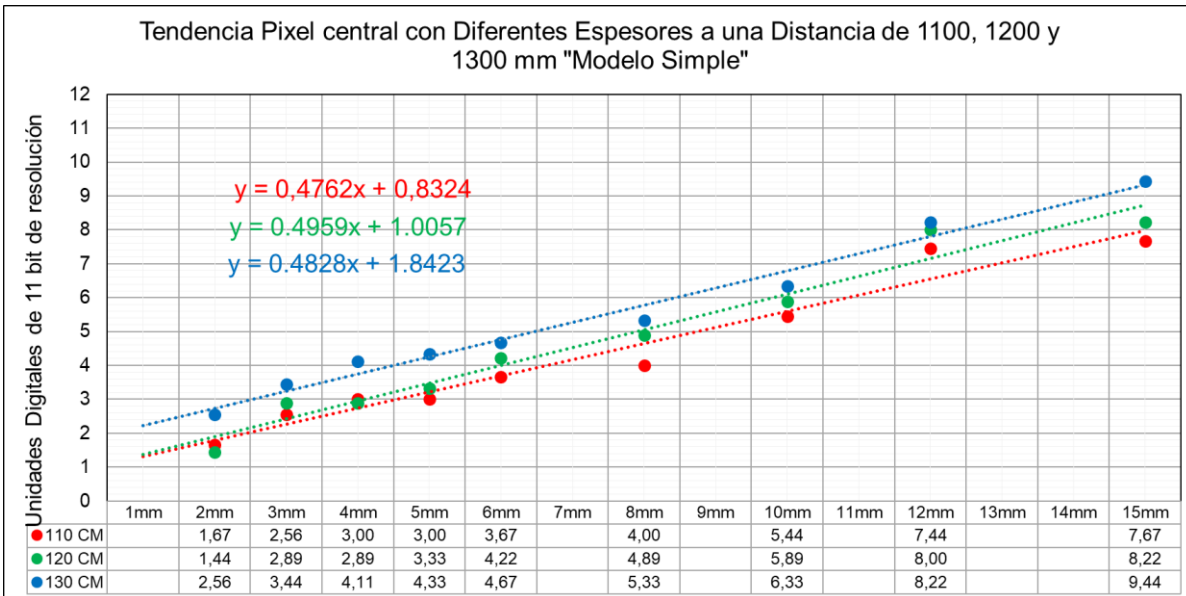


Figura: 4-9 Comparación de los tres modelos lineales resultantes del cambio de espesor con "TOF" simple

4.1.4 Validación de los Modelos lineales para diferentes distancias de adquisición

Para la validación de los modelos lineales encontrados anteriormente, se realizó el análisis de un vidrio plano transparente de seis milímetros de espesor por ser éste un espesor intermedio entre las diferentes muestras de vidrio, para la adquisición se ubicó la superficie del vidrio en el centro del background posición "B2", esta posición coincide también con el centro espacial de la cámara, las distancias de adquisición del Kinect con respecto al background variaron de 1000 mm, 1200 mm y 1300 mm respectivamente. Luego de las adquisiciones continuas y su posterior filtrado, se graficaron los resultados utilizando nubes de puntos (ya que facilita la observación de posibles variaciones entre las medidas de profundidad en la superficie del vidrio transparente). Para hallar la magnitud de la dispersión de los datos se calcula la desviación estándar. En la **figura 4-8** con nubes de puntos en color rojo se encuentra el resultado de la adquisición de las imágenes de profundidad a una distancia de 1100 mm, aunque la medida de profundidad está cercana al espesor real, la desviación estándar es de 0.70 observándose puntos que varían más de 2 mm de espesor. En la **figura 4-9** se encuentra, en nubes de puntos de color verde, la imagen de profundidad adquirida a una distancia de 1200 mm, donde se observa una dispersión en los datos más alta que la primera con 0.75 y un promedio de 6.3 de espesor, pero igualmente con variaciones entre puntos mayores a 2 mm de espesor. Por último en la **figura 4-10** se encuentra en nubes de puntos de color azul, la imagen de profundidad adquirida a una distancia de 1300 mm con un valor promedio de profundidad de 4.9, muy alejado del real, esto se explica ya que la

desviación estándar es la más alta de todas las medidas, este aumento de la desviación estándar a medida que se aleja la cámara de adquisición también fue evidenciado por [12].

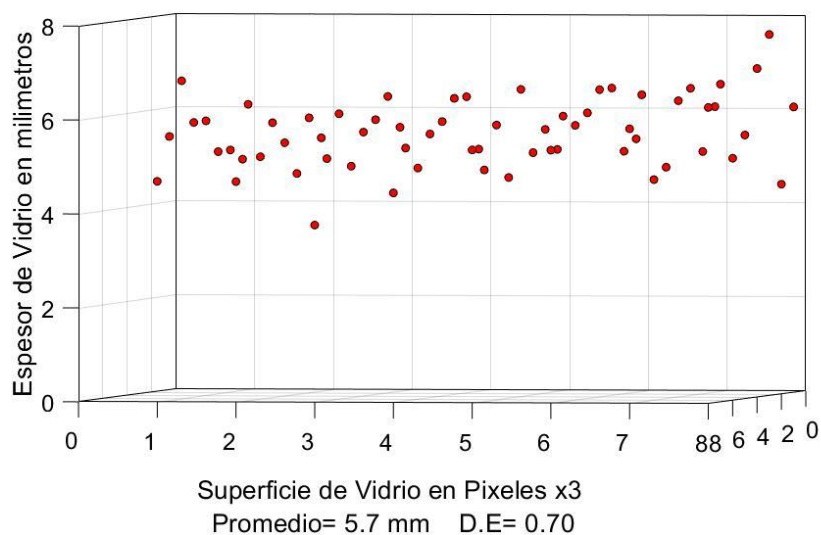


Figura: 4-10 Representación en nubes de puntos de la superficie de una placa de vidrio con un espesor de 6 mm, adquirida a una distancia de 1100 mm, con el modelo simple

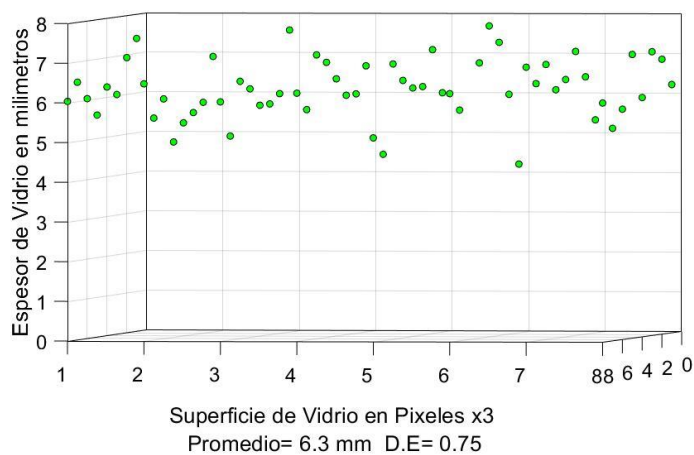


Figura: 4-11 Representación en nubes de puntos de la superficie de una placa de vidrio con un espesor de 6 mm, adquirida a una distancia de 1200 mm, con el modelo simple

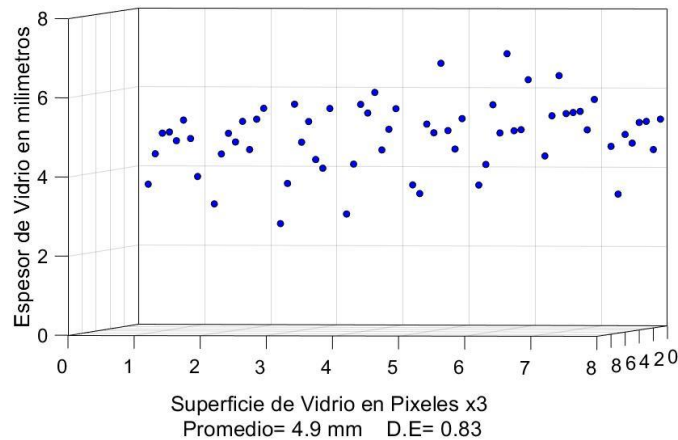


Figura: 4-12 Representación en nubes de puntos de la superficie de una placa de vidrio con un espesor de 6 mm, adquirida a una distancia de 1300 mm, con el modelo uno

4.1.5 Aplicación de la técnica “TOF” simple para contenedores de vidrio curvo transparente

El procedimiento para la adquisición de las imágenes de profundidad RGBD a los contenedores de vidrio curvo transparente, fue similar al de los vidrios transparentes planos, pero reemplazando el background plano por uno que tuviera la misma forma del contenedor, posteriormente se realizó la diferencia aritmética entre cada uno de los pixeles de las dos imágenes RGBD adquiridas y filtradas como se explicó en el capítulo anterior. En la **figura 4-13 a**, se observa la imagen de la muestra de vidrio curvo grande que está sobre el background, en la **figura 4-13 b** se encuentra la imagen adquirida solo al background con cavidad curva, y en la **figura 4-13 c**, está la diferencia de las dos imágenes anteriores, esta nueva imagen contiene sólo el valor del espesor de la superficie de del vidrio curvo analizado. Luego en las **figura 4-13 d, e, f**, se muestra el mismo procedimiento explicado anteriormente pero esta vez en un contenedor de vidrio curvo de tamaño mediano y finalmente se realiza el mismo procedimiento pero a un contenedor redondo pequeño el cual se muestra en la **figura 4-13 g, h i**.

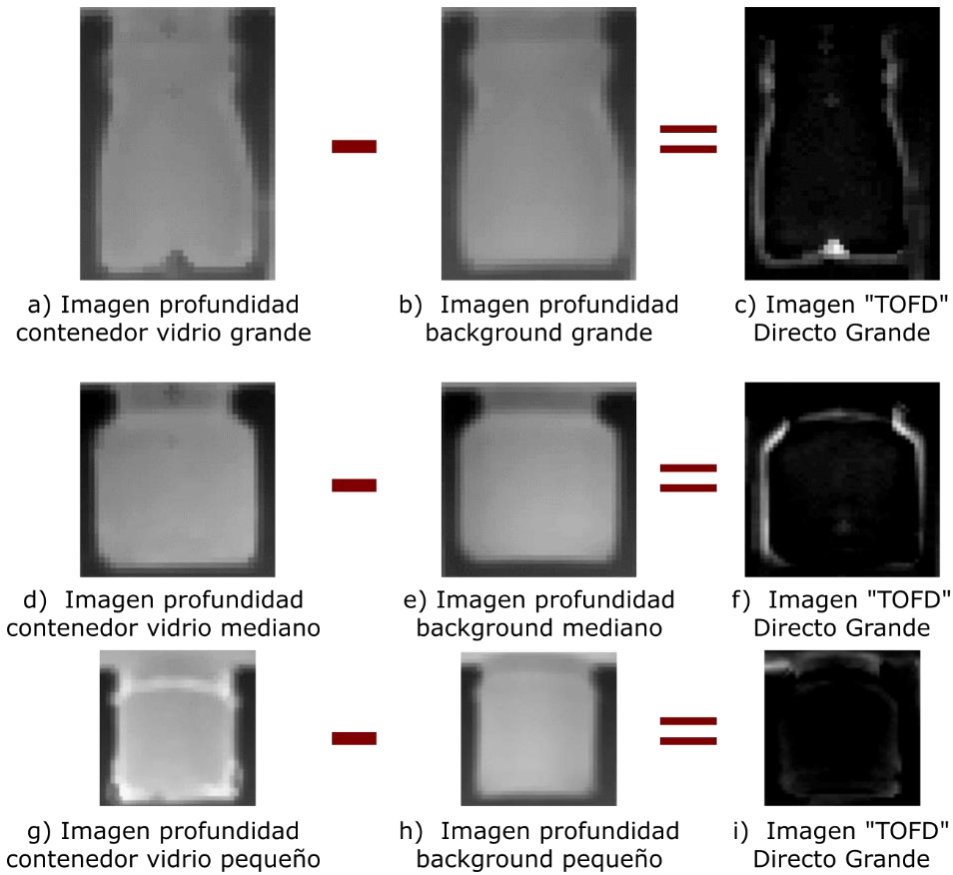


Figura: 4-13 Aplicación de la técnica "TOF" simple en contenedor curvo transparente con tamaños que varían en grados medianos y pequeños

4.1.6 Modelo simple propuesto para la detección de espesor en contenedores de vidrio transparente

Con las diferentes variables que intervienen en el proceso de adquisición de las imágenes de profundidad analizadas en los capítulos anteriores, y luego de analizar los diferentes resultados obtenidos en las experimentaciones, se propone un modelo matemático, el cual permite conocer el cambio de espesor en la superficie completa de los vidrios planos transparentes o en una de las caras de los contenedores con forma curva, a partir de las imágenes obtenidas con la técnica "TOF" simple. En la **Ecuación 4-1** se muestran los parámetros y las variables contempladas para hallar el espesor en la superficie de los vidrios en unidades de milímetros. En la **Tabla 5**, se muestran los valores que deben asumir las variables de K_1 , K_2 y K_3 dependiendo de la distancia de adquisición y de la ubicación de la muestra de vidrio sobre el background.

$$E = [(0.4762 + K_1)X + 0.8324 + K_2] + K_3 \quad 4-1$$

Descripción de las variables del modelo propuesto

E = Valor del espesor en milímetros.

K_1, K_2 = Variables que dependen de la distancia de adquisición de la imagen profundidad.

K_3 = Variable que depende de la ubicación espacial de la muestra y de la distancia de adquisición de la imagen de profundidad.

Tabla 4 Con los valores de las diferentes variables que intervienen en modelo simple, para la detección del cambio de espesor en superficies de vidrio transparente.

Distancia/Constante	K1	K2	K3/A1	K3/A2	K3/A3	K3/B1	K3/B2	K3/B3	K3/C1	K3/C2	K3/C3
1100 mm	0	0	-0,309	-0,432	-0,568	0,938	0	0,840	1,907	1,037	1,469
1200 mm	0,020	0,173	-0,630	-0,605	-1,444	-0,704	0	-0,235	-0,160	0,765	1,099
1300 mm	0,007	1,010	-0,160	0,716	-0,272	0,790	0	0,025	0,284	-0,704	-0,321

4.2 Metodología compuesta para la detección del cambio de espesor en la superficie de los contenedores de vidrio transparente

La metodología compuesta propuesta para la detección del cambio de espesor en contenedores de vidrios transparentes es muy similar a la descrita en el modelo simple, la diferencia radica en el reemplazo del background para calcular los valores de espesor por el de las muestras opacas, que cuentan con la misma forma y espesor del vidrio transparente analizado en los diferentes casos. En la **Figura: 4-14** se observa en el recuadro de color verde los pasos que se deben seguir para la detección del cambio de espesor en la superficie del vidrio, y en el recuadro de color rojo los pasos adicionales que se deben seguir para hallar el modelo compuesto teniendo en cuenta las variables que afectan la medida de profundidad como es la ubicación espacial de la muestra con respecto al campo de visión de la cámara. Lo que se busca con esta técnica es mejorar la resolución de detección para observar cambios de espesor más pequeños comparados con la técnica simple vista anteriormente.

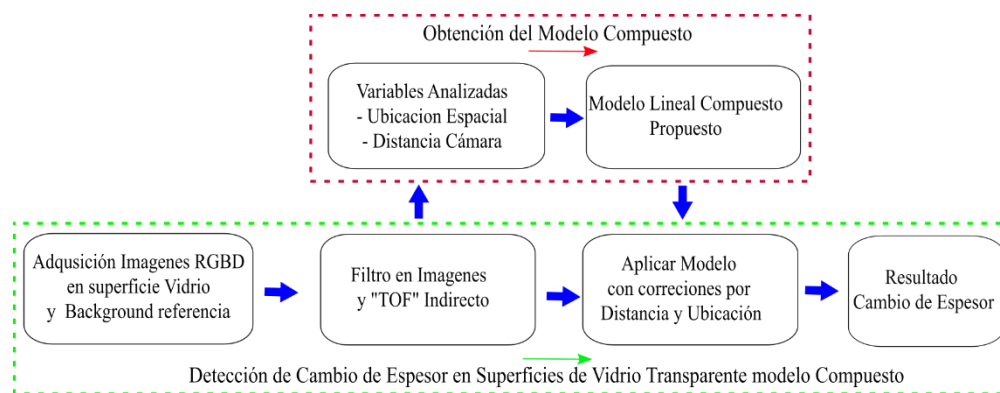


Figura: 4-14 Metodología compuesta propuesta para la detección del cambio de espesor en la superficie de vidrio transparente

4.2.1 Procedimiento para analizar las imágenes mediante “TOF” para el modelo compuesto

Para hallar el valor digital causado por la distorsión del vidrio transparente en las imágenes de profundidad para el modelo compuesto, se realizó la diferencia aritmética entre la imagen de profundidad del material opaco y la imagen de las muestras de vidrio con diferentes espesores. En la **Figura: 4-215 a** se observa la imagen de profundidad adquirida a los nueve vidrios planos transparentes que se encontraban sobre el background, en la **Figura: 4-215 b** se encuentra la imagen de las muestras opacas con los mismos espesores de los vidrios, y en la **Figura: 4-24-15 c** se encuentra la imagen con la diferencia aritmética de las dos imágenes de profundidad anteriores, esta nueva imagen contiene sólo el valor digital del espesor de la superficie de los vidrios planos analizados. Igual al procedimiento para el modelo simple, las muestras de vidrio se fueron rotando una posición como se muestra en la **Figura: 4-3 4-16 a**, donde se observa el valor de profundidad resultante de los diferentes espesores después de aplicar la diferencia. Se inicia con el vidrio de 2 mm en la posición izquierda superior A1, luego en la **Figura: 4-3 4-16 b** se realiza el primer desplazamiento hacia la izquierda, este mismo procedimiento se repitió hasta llegar a la posición que se aprecia en la **Figura: 4-34-16 i**, garantizando que cada muestra haya pasado por todas las posiciones espaciales dentro del background.

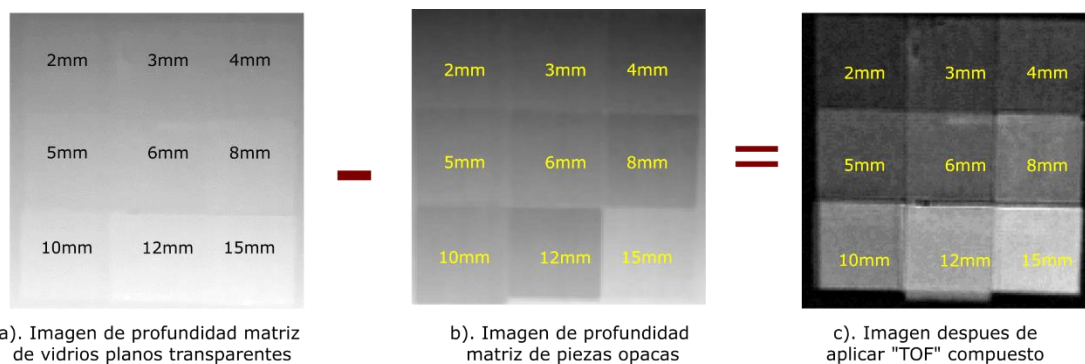


Figura: 4-15 Aplicación de la técnica “TOFI” indirecta en la superficie de la matriz de vidrios planos con diferentes espesores

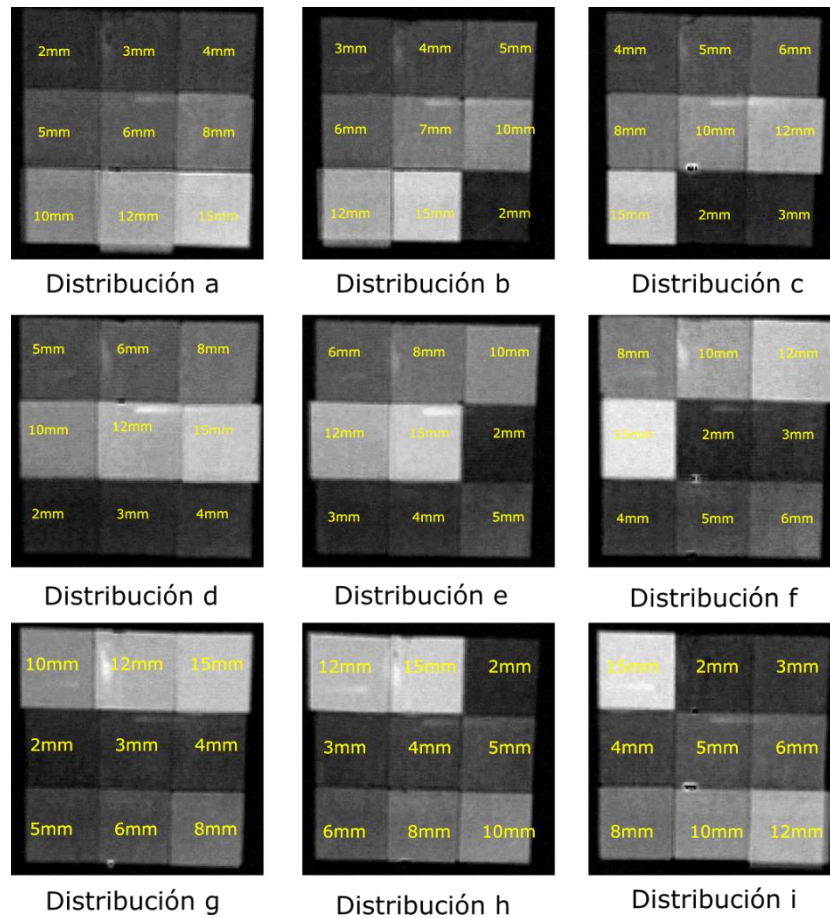


Figura: 4-16 Imágenes con los valores digitales resultante después de la diferencia con las muestras opacas, técnica “TOFP” indirecta

Similar al procedimiento simple, se reorganizan las muestras de tal manera que el valor digital del vidrio de cada espesor se muestre en cada posición diferente de la imagen resultante, como se aprecia en la **figura 4-17 a**. Para el posterior análisis de los datos se dividen todas las imágenes en subgrupos de 3 x 3 píxeles, el resultado de esta operación se muestra en la **figura 4-17 b**, el valor digital promedio obtenido de la subdivisión anterior se observa en la **figura 4-18**, esta matriz resultante se dividió a su vez en nueve partes iguales comenzando en la parte superior con A1, A2 y A3, en la parte central se encuentra B1, B2 y B3 y por último en la parte inferior están C1, C2 y C3, esto con el fin de realizar los diferentes análisis y comparaciones de los datos de cada posición espacial diferente

separadas entre sí, lo que sugiere que con este método es posible realizar una detección más precisa en el cambio de espesor que con el método simple visto anteriormente.

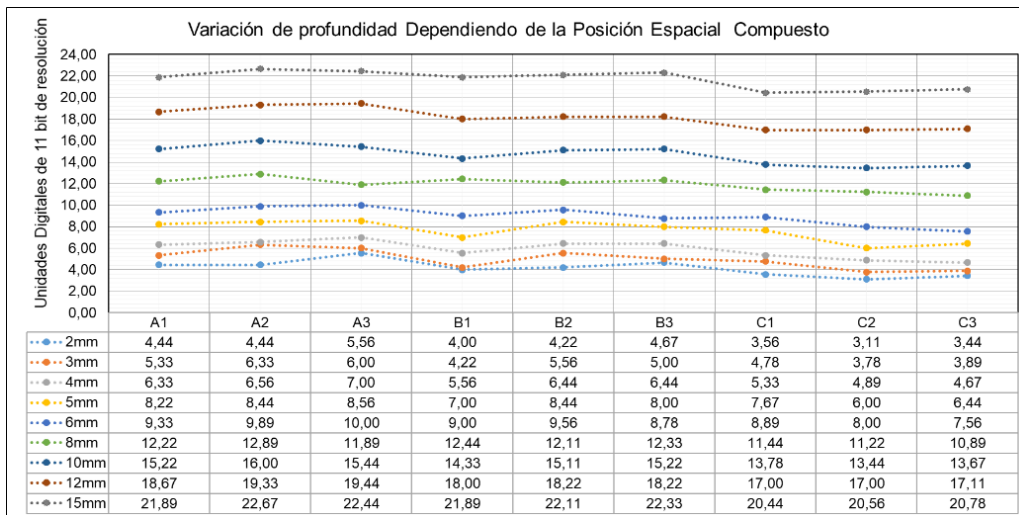


Figura: 4-19 Valor de profundidad de las muestras de vidrio plano transparente con respecto a la posición espacial dentro del background en el modelo compuesto

Posteriormente con los mismos datos se realizó una gráfica de color radial, tomando como referencia la posición central del *background* "B2" y se realizó la diferencia aritmética con respecto a cada posición vecina en grados como se muestra en la **figura 4-20**, donde se observa que las posiciones inferiores C1, C2 y en menor proporción C3 presentan la mayor variación en el valor de profundidad con respecto a la posición central B2, similar a lo ocurrido en la gráfica radial del modelo simple analizada anteriormente

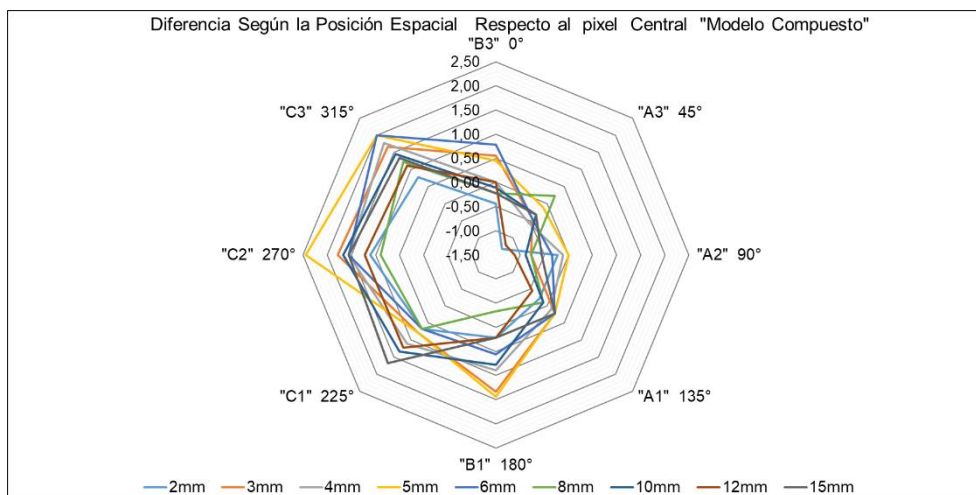


Figura: 4-20 Gráfica radial, con la diferencia del pixel central "B2" Vs las demás posiciones espaciales dentro del background en el modelo compuesto

4.2.3 Cambio en el valor de profundidad variando el espesor de las muestras para el modelo compuesto

El análisis de la variable de espesor mediante el modelo compuesto se realizó similar al modelo simple, en la **figura 4-21** se observa la gráfica que corresponde a los valores digitales obtenidos de la matriz de promedio (**figura 4-18**) del pixel central en cada subregión comenzando con A1 hasta llegar a C3. Estos datos se ubicaron en el eje de las abscisas para cada espesor diferente, en el eje de las ordenadas se ubicó el valor de profundidad en unidades digitales con resolución de once bit representados en una escala de 0 a 24 unidades, en esta gráfica se evidencia que aunque la escala en el eje de las ordenadas se incrementó, los datos tienen menos dispersión y están más cercanos entre sí, y aunque existen algunas diferencias en los valores digitales dependiendo de la ubicación, son menores que en el modelo simple.

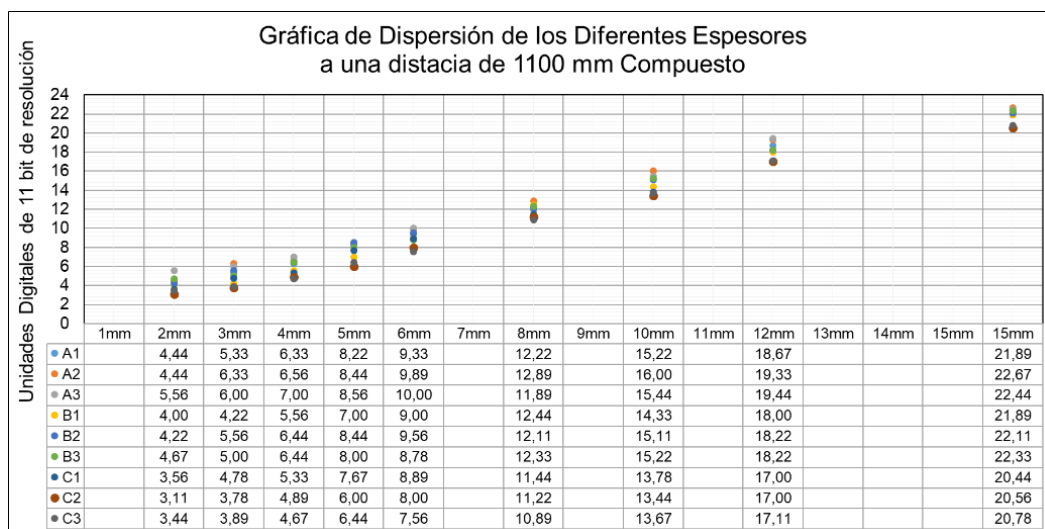


Figura: 4-21 Valor de profundidad de las muestras de vidrio con respecto al cambio de espesor, en las diferentes posiciones espaciales del modelo compuesto

Luego, como en el caso del modelo simple, se haya una función polinómica de primer orden que represente mediante una función lineal la tendencia que experimentan los datos de profundidad de las imágenes RGBD, en la **figura 4-22** se observa en las abscisas el valor en milímetros de los diferentes espesores ubicados en el pixel central, (posición B2 del background) y en el eje de las ordenadas se encuentra el valor digital obtenido luego de aplicar la técnica “TOF” compuesto. La línea de tendencia roja corresponde a la adquisición realizada a 1100 mm de distancia, la línea de tendencia azul corresponde a 1200 mm de distancia y la línea de tendencia verde es la adquisición más retirada a 1300 mm de distancia, en el lado izquierdo de la gráfica se encuentran los diferentes modelos lineales hallados, los cuales representan una función diferente para cada distancia. A diferencia del modelo simple, las tendencias en el modelo compuesto son muy similares como el caso de la distancia de 1200 mm y 1300 mm las cuales sólo varían muy poco al comienzo.

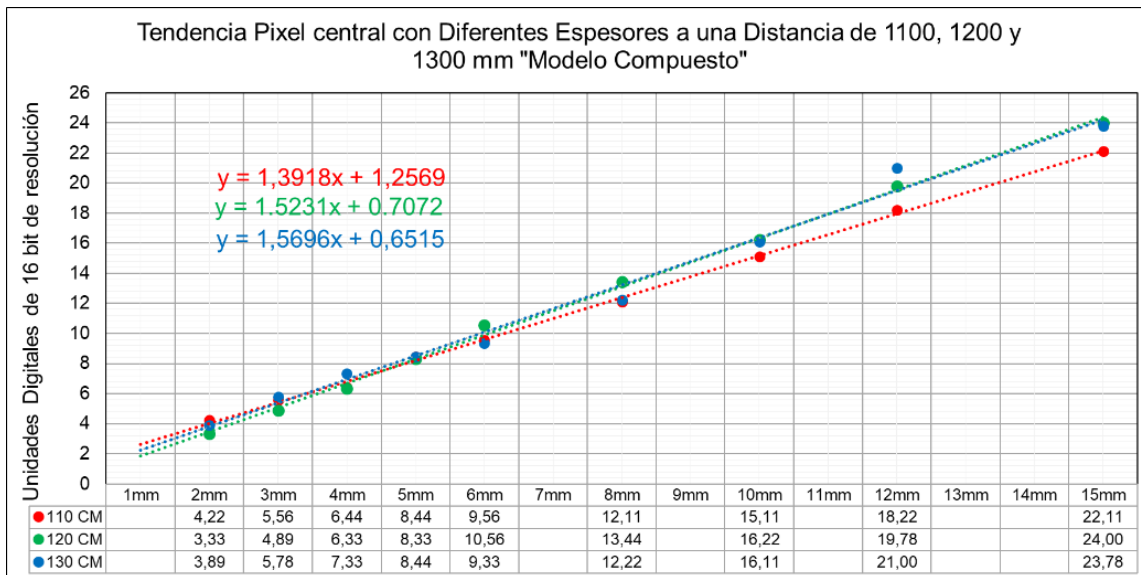


Figura: 4-22 Comparación de los tres modelos lineales resultante del cambio de espesor con "TOF" compuesto

4.2.4 Validación de los Modelos lineales para diferentes distancias de adquisición

Para la validación de los modelos lineales compuestos encontrados anteriormente también se realizó el análisis con un vidrio plano transparente de seis milímetros de espesor, como en la validación simple, para la adquisición se ubicó la superficie del vidrio en el centro del background posición "B2", las distancias de adquisición del Kinect con respecto al background fueron de 1100 mm, 1200 mm y 1300 mm respectivamente. Luego de las adquisiciones continuas y su posterior filtrado, se graficaron los resultados utilizando nubes de puntos, en la **figura 4-23** se aprecian los valores de profundidad con puntos de color rojo, la adquisición de las imágenes se realizó una distancia de 1100 mm, el promedio de la medida del espesor es de 6.1 mm y la desviación estándar fue de 0.2, se observa una mejora en los dos valores con respecto al modelo simple. En la **figura 4-24**, se encuentra la gráfica en nubes de puntos de color verde de la imagen de profundidad adquirida a una distancia de 1200 mm, donde se observa un leve incremento en la del valor de la desviación estándar 0.25 y un valor promedio del espesor de 5.9 mm, y por último en la **figura 4-25** se encuentra la gráfica en nubes de puntos de color azul de la imagen de profundidad adquirida a una distancia de 1300 mm, con un valor promedio de profundidad de 6.5 y una desviación estándar de 3.2, la más alta de las tres medidas, lo que refuerza el patrón encontrado en el análisis del modelo simple, confirmando que a medida que aumenta la distancia de adquisición también aumenta la desviación estándar de los datos y por consiguiente el valor del espesor presenta mayor variación.

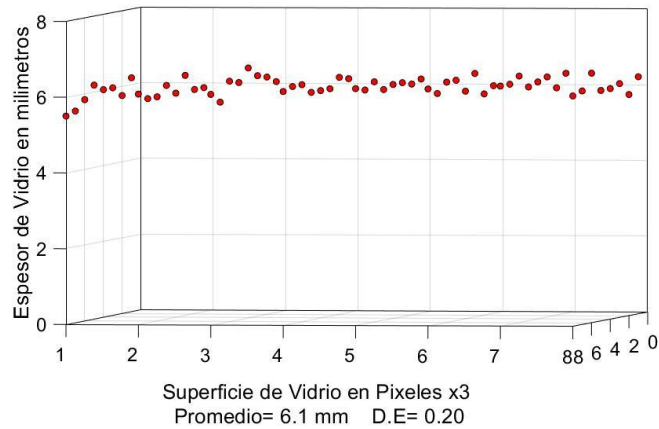


Figura: 4-23 Representación en nubes de puntos de la superficie de una placa de vidrio con un espesor de 6 mm, adquirida a una distancia de 1100 mm, con el modelo compuesto

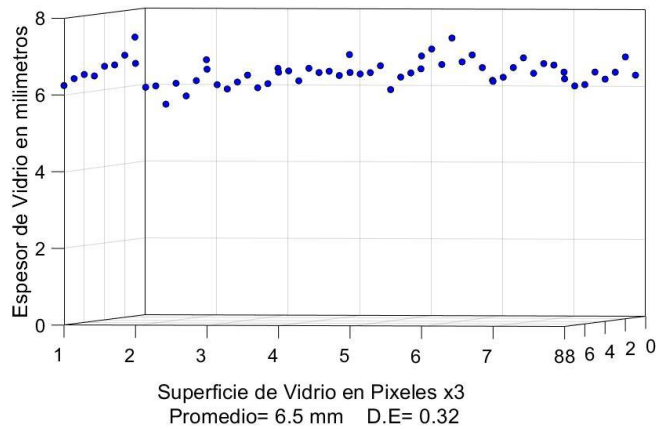


Figura: 4-24 Representación en nubes de puntos de la superficie de una placa de vidrio con un espesor de 6 mm, adquirida a una distancia de 1200 mm, con el modelo compuesto

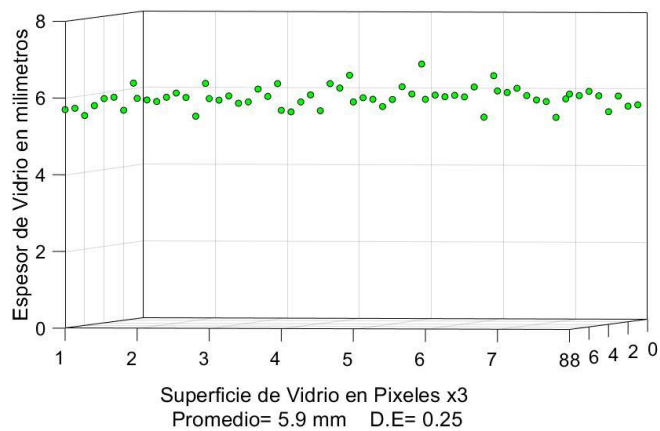


Figura: 4-25 Representación en nubes de puntos de la superficie de una placa de vidrio con un espesor de 6 mm, adquirida a una distancia de 1300 mm, con el modelo compuesto

4.2.5 Aplicación de la técnica “TOFD” compuesta en la detección del cambio de espesor en contenedores de vidrio curvo transparente

El procedimiento para la adquisición de las imágenes de profundidad RGBD a los contenedores de vidrio curvo transparente, fue similar a la metodología simple, pero la diferencia estuvo en adicionar una muestra opaca con la misma forma y espesor que la de los contenedores curvos con diferentes tamaños, igualmente se realizó la diferencia aritmética entre cada uno de los pixeles de las dos imágenes RGBD adquiridas y posteriormente filtradas. En la **figura 4-26** se muestra el procedimiento realizado a un contenedor curvo de tamaño grande, donde la **figura 4-26 a** ilustra la imagen de la muestra de vidrio curvo grande que está sobre el background, en la **figura 4-26 b** se encuentra la imagen adquirida al contenedor opaco con cavidad curva grande, y en la **figura 4-26 c** está la diferencia de las dos imágenes, esta nueva imagen contiene sólo el valor del espesor de la superficie de los vidrios curvos analizados. En las **figura 4-26 d, e, y f**, se muestra el mismo procedimiento realizado anteriormente pero esta vez a un contenedor de vidrio curvo de tamaño mediano y finalmente se aplica el mismo procedimiento pero a un contenedor redondo de vidrio pequeño mostrado en la **figura 4-26 g, h y i**.

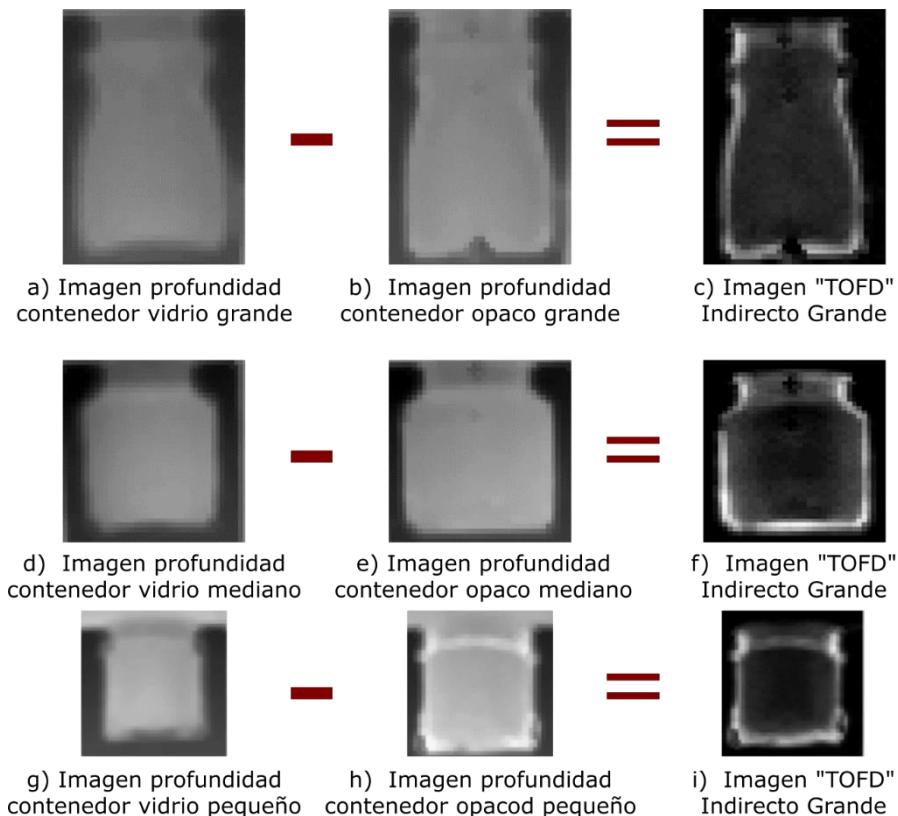


Figura: 4-26 Aplicación de la técnica “TOFD” compuesto en contenedor curvo trasparente con diferentes tamaños

4.2.6 Modelo compuesto “TOF” para la detección del cambio de espesor en contenedores de vidrio transparente

Similar al modelo simple y luego de analizar los diferentes resultados obtenidos en las experimentaciones, se propone un modelo matemático que permite conocer el cambio de espesor en la superficie completa de los vidrios planos transparentes o en una de las caras de los contenedores con forma curva, a partir de las imágenes obtenidas con la técnica “TOF” compuesta. En la **Ecuación 4-12** se muestran los parámetros y las variables contempladas para hallar el espesor en la superficie de los vidrios en unidades de milímetros. En la **Tabla 6**, se muestran los valores que deben asumir las variables de K_1 , K_2 y K_3 dependiendo de la distancia de adquisición y de la ubicación de la muestra de vidrio sobre el background.

$$E = [(1.3918 + K_1)X + 1.2569 + K_2] + K_3 \quad 4-2$$

Descripción de las variables del modelo propuesto

E = Valor del espesor en milímetros.

K_1, K_2 = Variables que dependen de la distancia de adquisición de la imagen profundidad.

K_3 = Variable que depende de la ubicación espacial de la muestra y de la distancia de adquisición de la imagen de profundidad.

Tabla 5, Con los valores de las diferentes variables que intervienen en modelo compuesto, para la detección del cambio de espesor en superficies de vidrio transparente.

Distancia/Constante	K1	K2	K3/A1	K3/A2	K3/A3	K3/B1	K3/B2	K3/B3	K3/C1	K3/C2	K3/C3
1100 mm	0	0	0,01	-0,53	-0,51	0,59	0	0,09	0,99	1,53	1,48
1200 mm	0,131	-0,550	-0,14	-0,01	-0,60	0,15	0	0,32	0,79	0,57	1,26
1300 mm	0,178	-0,605	0,568	0,926	0,827	0,062	0	0,259	-0,148	0,198	0,358

4.3 Análisis de resultados

Los resultados obtenidos con las dos metodologías empleadas para el análisis del cambio de espesor en una de las superficies de los contenedores de vidrio transparente plano y curvo, se pueden analizar mediante estas tres variables: distancia de adquisición, ubicación espacial de la muestra y modelo lineal de orden uno, que correlaciona el espesor con los valores digitales de la imagen resultante. A continuación, se compara el resultado de estas variables en los modelos simple y compuesto.

Para la adquisición de las imágenes de profundidad se emplearon tres distancias diferentes de 1100 mm, 1200 mm y 1300 mm respectivamente, en el modelo simple debido a la técnica empleada “TOF” simple, el valor de la desviación estándar fue mayor y la resolución de la medida de profundidad menor como se observan en la **figura 4-9**, al momento de hallar el modelo lineal para cada distancia era diferente en cada caso, mientras que en la **figura 4-22** las mismas variables, esta vez analizada con la técnica “TOF” compuesta, se observa una distribución entre los puntos menor y por consiguiente una mayor similitud entre los valores de modelos lineales hallados para cada una de las distancias analizadas.

Cuando la muestra de vidrio se encuentra desplazada con respecto al centro espacial del campo de visión de la cámara, el valor de profundidad tiene una variación hasta de dos unidades digitales, pero lo relevante es que para los nueve espesores diferentes, tienen un comportamiento similar tanto en el modelo uno **figura 4-7** como en el modelo dos **figura 4-20**, por lo que se puede tomar como una constante para cada posición y simplificar de esta manera su incidencia en el modelo final propuesto, mediante la **tabla 5** para el modelo simple y la **tabla 6** para el modelo compuesto.

Los modelos lineales hallados con los datos obtenidos de las diferentes adquisiciones, y luego de ser transformados con las diferentes técnicas, muestran que el modelo compuesto tiene una desviación estándar mucho menor y una mayor resolución en la detección del espesor que la del modelo simple, esto se evidencia con la **figura 4-10** y la **figura 4-23**, ambas se aplicaron a un vidrio transparente de 6 mm a una distancia de 1100 mm, siendo los resultados favorables al modelo compuesto. Los mismos resultados se obtuvieron con las **figuras 4-11** y la **figura 4-24** de un vidrio igualmente de 6 mm pero a una distancia de adquisición de 1200 mm, y por último para las **figuras 4-12** y la **figura 4-25** también para un vidrio de 6 mm pero a una distancia adquisición de 1300 mm.

La evaluación del espesor en los contenedores de vidrio con forma curva mediante el modelo simple y el modelo compuesto, se desarrolló de forma similar que para los vidrios planos transparentes, con la diferencia que se implementó un nuevo background con la forma

geométrica similar a la del contenedor analizado y se realizó en contenedores de diferentes tamaños.

El resultado de este capítulo son los dos modelos propuestos que se aplican para analizar superficies de vidrios planas y curvas. Los modelos propuestos cuentan con tres variables K1, K2 y K3, las cuales varían dependiendo de la distancia de adquisición y de la ubicación espacial de la muestra dentro del campo visual de la cámara Kinect, aplicando las constantes mostradas en la **tabla 5** para el modelo simple y la **tabla 6** para el modelo compuesto.

5. Evaluación de las metodologías propuestas para la detección de cambio de espesor en contenedores de vidrio transparente

En este capítulo se realizó la evaluación de las dos metodologías propuestas anteriormente para la detección del cambio de espesor en la superficie de las paredes de vidrios planos y curvos transparentes, para este análisis se adquirieron ochenta imágenes de profundidad de cada una de las muestras que se encontraban en el centro del background “B2”, la distancia de adquisición fue de 1100 mm tomada desde la cámara Kinect hasta la superficie del background, una vez adquiridas las imágenes de profundidad se pasaron por el proceso de filtrado explicado en el capítulo dos, el resultado obtenido es una imagen de profundidad para cada una de la muestras de vidrio adquiridas. En el proceso de evaluación primero se tomó el modelo simple, los datos obtenidos se dividieron en tres partes: en la primera, se realizó la reconstrucción del espesor en placas de vidrio plano transparente de un mismo espesor, en la segunda se adquirieron imágenes de profundidad simultáneas a dos placas de vidrio plano pero con diferentes espesores, iniciando con una diferencia de 1 mm entre ellas (2 mm a 3 mm y 5 mm a 6 mm) y posteriormente con diferencias de 2 mm (10 mm a 12 mm), en la tercera parte, se aplicó el mismo modelo pero esta vez a placas de vidrio curvo de diferentes tamaños (grande, mediano y pequeño). El anterior procedimiento se repitió para el análisis del modelo compuesto, se desarrollaron las mismas pruebas de reconstrucción de espesor en vidrio plano transparente con un solo espesor, y luego combinando varios espesores. Por último, se analizaron las muestras de vidrio curvo transparente grandes, medianas y pequeñas con el modelo compuesto

5.1 Evaluación del modelo simple en la superficie de contenedores de vidrio plano transparente

Para la evaluación del modelo simple y siguiendo la metodología propuesta, se realizaron las 80 adquisiciones continuas a las nueve muestras de vidrio plano transparente con diferentes espesores (2mm, 3mm, 4mm, 5mm, 6mm, 8mm, 10mm, 12mm y 15mm), posteriormente se realizó el preprocesamiento, y luego se aplicó el modelo simple; el resultado obtenido se muestra mediante varias gráficas donde la intensidad y el color de la imagen se correlacionaron con el espesor de la muestra analizada, la escala de color se anexó al lado derecho de cada imagen, el color azul oscuro representa los valores de espesor cercanos a cero y el color naranja muestra los valores cercanos y mayores a 15 mm. En la **figura 5-1 a** se observa la reconstrucción del espesor para una placa de vidrio plano transparente de 2 mm, que presenta una mezcla de color entre azul claro y oscuro con datos poco homogéneos, los valores obtenidos se encuentran en la parte inferior de la gráfica donde inicialmente está el espesor real del vidrio medido con un calibrador y luego aparece el valor de la desviación estándar (D.E) de los datos hallados con la técnica simple. Esta muestra una dispersión en

los valores del espesor de la superficie del vidrio de 0.67, también se aprecian los valores máximo y mínimo de los datos y el promedio equivalente del espesor en el área completa del vidrio. En la figura **figura 5-1 b** se encuentra la misma información pero para un vidrio de 3 mm y así sucesivamente hasta llegar a la **figura 5-1 i**, que muestra la imagen con los datos para un vidrio plano transparente de 15 mm. Los resultados obtenidos de la reconstrucción de las muestras de vidrio plano transparente con el modelo simple muestra que, aunque el valor promedio es cercano al espesor real, existe una dispersión de los datos muy alta lo que se refleja en los valores máximos y mínimos, y se respalda con el valor de la dispersión estándar, por consiguiente, este modelo simple presenta una baja resolución en la medida.

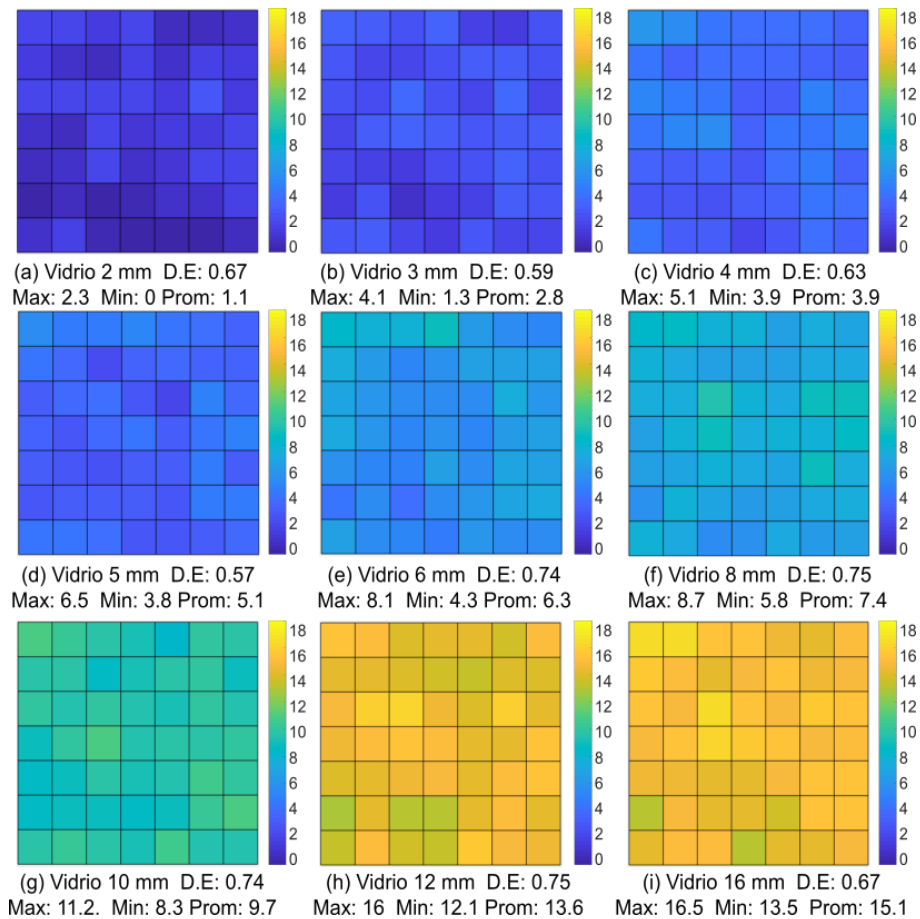


Figura 5-1 Evaluación de la metodología simple, aplicada a la superficie de nueve muestras de vidrio plano transparente con diferentes espesores

Para la segunda evaluación del modelo simple, se adquirieron nuevamente ochenta imágenes de profundidad simultáneas, esta vez a dos muestras de vidrio plano con diferentes espesores ubicadas simultáneamente sobre el background en la posición central “B2”. Las primeras adquisiciones fueron realizadas a dos muestras de vidrio con 2 y 3 mm de espesor respectivamente, el resultado se aprecia en la **figura 5-2 a**, donde se observa una

variación en la intensidad del color en la superficie completa de la muestra, en la parte superior está de color azul claro indicando el espesor de 2 mm, y en la parte inferior azul oscuro representando el espesor de 3 mm. En la **figura 5-2 b**, se muestran los mismos valores, pero ahora en un formato 3D donde se aprecia un comportamiento discontinuo en el espesor en toda la superficie del vidrio. Para identificar el cambio de espesor en la superficie del vidrio plano transparente se utilizó un clasificador tipo clustering no supervisado “*K-means*” para los datos generados por la imagen de profundidad, y los cuales fueron representados por una gráfica de dispersión “nubes de puntos”, el resultado se muestra en la **figura 5-1 c**, donde los puntos amarillos representan el espesor de tres milímetros, y los azules el de 2mm. A pesar de que existe una clasificación de espesor, se observan zonas donde están mezclados los dos colores evidenciando la falta de resolución en el modelo simple. En la **figura 5-1 d**, se aprecian los mismos datos pero desde otro ángulo, los cuales muestran una leve diferencia en la imagen del cambio de espesor en el vidrio plano entre los espesores de 2 mm y 3 mm.

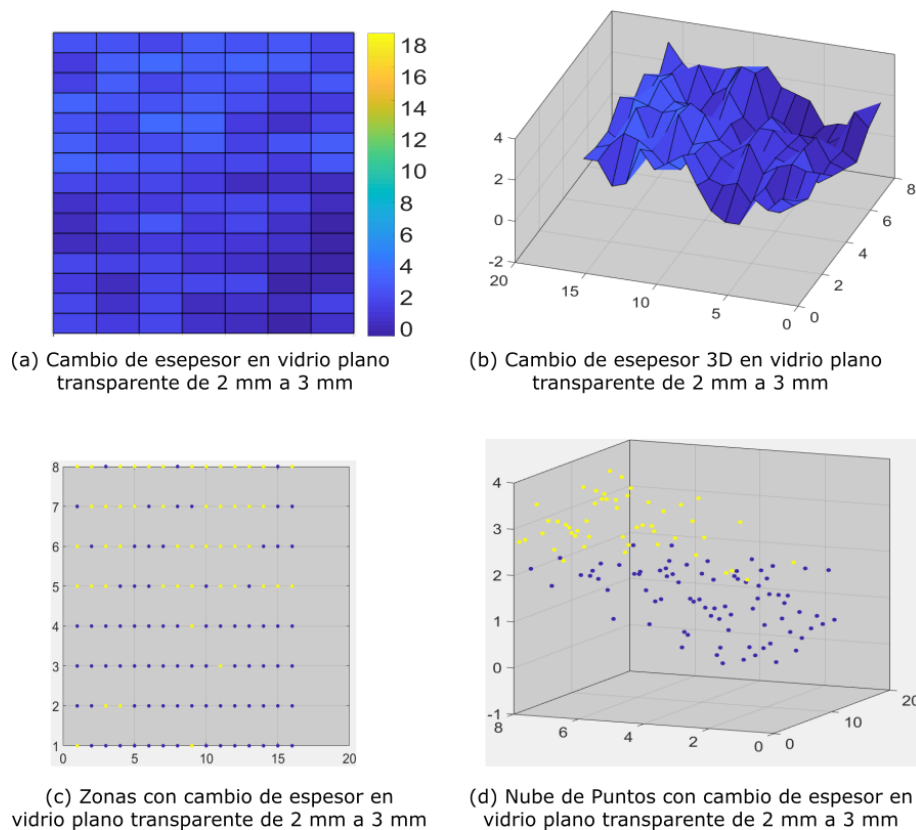
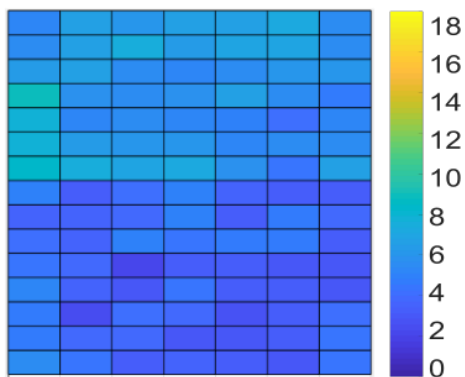


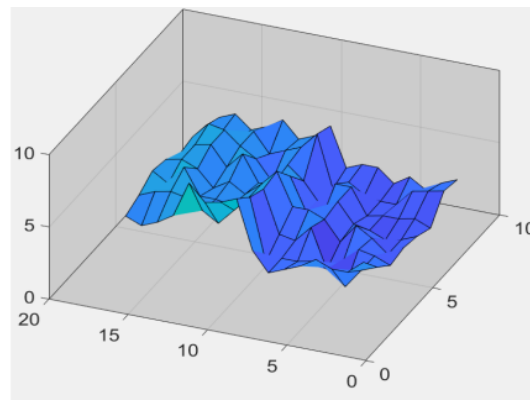
Figura 5-2 Evaluación de la metodología simple, aplicada a la superficie de una muestra de vidrio plano transparente que presenta un cambio de espesor de 2 mm a 3 mm

El procedimiento realizado anteriormente se repitió de nuevo con un cambio de espesor de un milímetro, esta vez utilizando dos muestras con espesor 5 mm y 6 mm, el resultado se

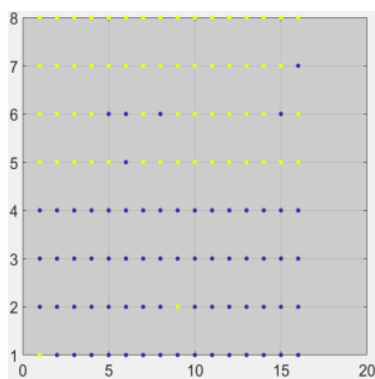
aprecia en la en la **figura 5-3 a**, donde se observa una variación en la intensidad del color: en la parte superior el color azul claro representa el espesor de 5 mm y en la parte inferior el azul más oscuro representa el espesor de 6 mm. En la **figura 5-3 b**, se muestra la imagen en 3D donde se evidencia un mejor comportamiento en el espesor en toda la superficie del vidrio que en el caso anterior. Para identificar el cambio de espesor en la superficie del vidrio se utilizó el mismo clasificador *K-means*, los resultados se muestran en una gráfica de dispersión “nubes de puntos” en la **figura 5-3 c**, allí en amarillo están los puntos que representan el espesor de 5mm y en azul los puntos equivalentes a 6mm. En la **figura 5-3 d** se aprecian los mismos datos anteriores, pero desde otro ángulo, mostrando una clasificación de espesor entre los vidrios planos de 5 mm y 6 mm, el comportamiento de los datos fue más homogéneo comparado con los datos encontrados en los vidrios de espesores de 2 mm y 3 mm.



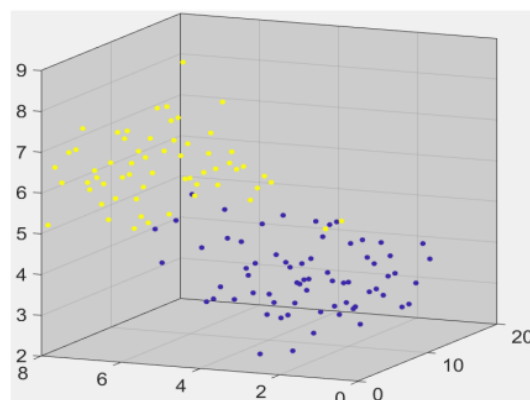
(a) Cambio de espesor en vidrio plano transparente de 5 mm a 6 mm



(b) Cambio de espesor 3D en vidrio plano transparente de 5 mm a 6 mm



(c) Zonas con cambio de espesor en vidrio plano transparente de 5 mm a 6 mm



(d) Nube de Puntos con cambio de espesor en vidrio plano transparente de 5 mm a 6 mm

Figura 5-3 Evaluación de la metodología simple, aplicada a la superficie de una muestra de vidrio plano transparente la cual presenta un cambio de espesor de 5 mm a 6 mm

Se realizó el procedimiento anterior nuevamente, ahora con un cambio de espesor de dos milímetros, utilizando dos muestras de vidrio plano de 10 mm y 12 mm, el resultado se muestra en la **figura 5-4 a** donde se observa una variación en la tonalidad bien definida del color: en la parte superior el color amarillo representa el espesor de 12 mm y en la parte inferior el verde claro representa el espesor de 10 mm. En la **figura 5-4 b** se muestra la imagen en 3D resultado de la clasificación con *K-means*, se observa que entre los dos colores se puede diferenciar fácilmente el cambio de espesor. En la **figura 5-4 c** se encuentra la gráfica de dispersión “nubes de puntos” donde los puntos amarillos representan el espesor de 12mm y los puntos verdes el equivalente a 10mm. En la **figura 5-4 d** están los mismos datos anteriores, pero desde otro ángulo, mostrando una clasificación de espesor entre los vidrios planos de 10 mm y 12 mm.

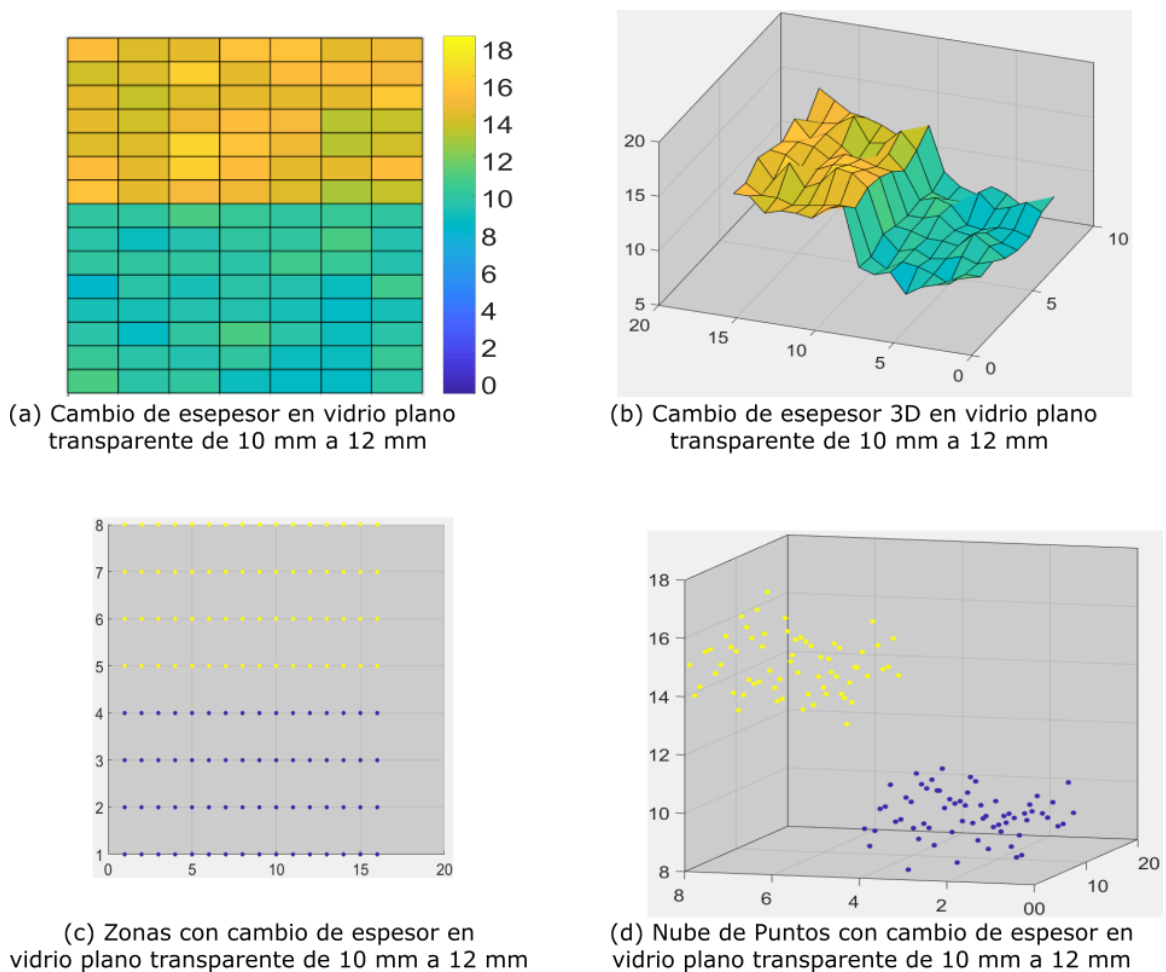


Figura 5-4 Evaluación de la metodología simple, aplicada a la superficie de una muestra de vidrio plano transparente la cual presenta un cambio de espesor de 10 mm a 12 mm

5.2 Evaluación del modelo simple en la superficie de contenedores curvos transparentes

La tercera evaluación del modelo simple se realizó en la superficie de tres contenedores de vidrio curvos transparentes con diferentes tamaños: contenedor grande con un espesor de 3.35 mm, contenedor mediano con espesor de 3.45 mm y contenedor pequeño con un espesor de 3.25 mm. En la **figura 5-5** se observa la medición del espesor de un contenedor de vidrio redondo mediano, el procedimiento metodológico fue similar al realizado anteriormente en los vidrios planos, donde se adquirieron ochenta imágenes de profundidad simultáneas al background y a las diferentes muestra de vidrio, pero esta vez con una geometría curva, luego de la adquisición de las imágenes de profundidad se realizó el proceso de filtrado y se evaluó con el modelo simple propuesto, el resultado obtenido se muestra en una imagen en 3D **figura 5-6 a**). Para conocer el valor del espesor en la superficie del vidrio se relaciona por medio de una imagen de color donde se adiciona al lado derecho la escala de espesor en milímetros como se muestra en la **figura 5-6 b**, el espesor obtenido con el modelo simple fue en promedio 2.5 mm con una desviación estándar de 2.65. En la **figura 5-6 c** se aprecia la misma imagen pero desde un ángulo diferente que muestra la reconstrucción de la superficie curva del contenedor, por último en la **figura 5-6 d** se observa una representación de la imagen anterior pero esta vez en nubes de puntos, para su análisis se aplicó el clasificador tipo clustering “K-means” seleccionando un K igual a 2 (para separar los posibles valores altos que presenta en los bordes la imagen y que no representa el espesor en la superficie del vidrio), en azul se observa los valores menores de 2 mm con mucha dispersión entre los datos. El procedimiento anterior se repitió luego para un contenedor de vidrio transparente con un tamaño mediano, en la **figura 5-7 a** se encuentra la imagen resultante en unidades digitales donde se observa la silueta del contenedor, en la **figura 5-7 b y c** se observa la imagen 3D a color después de aplicar el modelo simple. En los resultados se observa una desviación estándar menor debido a que la superficie del contenedor es más amplia lateralmente generando una curva más prolongada, el espesor real del vidrio es de 3.45 mm, mientras que el promedio de los datos muestra un espesor de 1.9 mm. Por último, en la **figura 5-7 d** se encuentra la imagen en nubes de puntos después de correr el clasificador tipo clustering “K-means”, confirmando la disminución en la dispersión de los datos en la superficie del contenedor. Finalmente se repitió todo el proceso anterior en un contenedor de vidrio con un tamaño pequeño, en la **figura 5-8 a** se observa la imagen en valores digitales. En la **figura 5-8 b y c** se encuentra la imagen de 3D a color donde se observa un área de superficie del vidrio más pequeña que las anteriores, la desviación estándar obtenida es de 3.3 con un promedio de espesor de 1.3 mm, mientras que el espesor real del contenedor es de 3.25 mm.



Figura 5-5 Medición de espesor con micrómetro en contenedor de vidrio curvo mediano

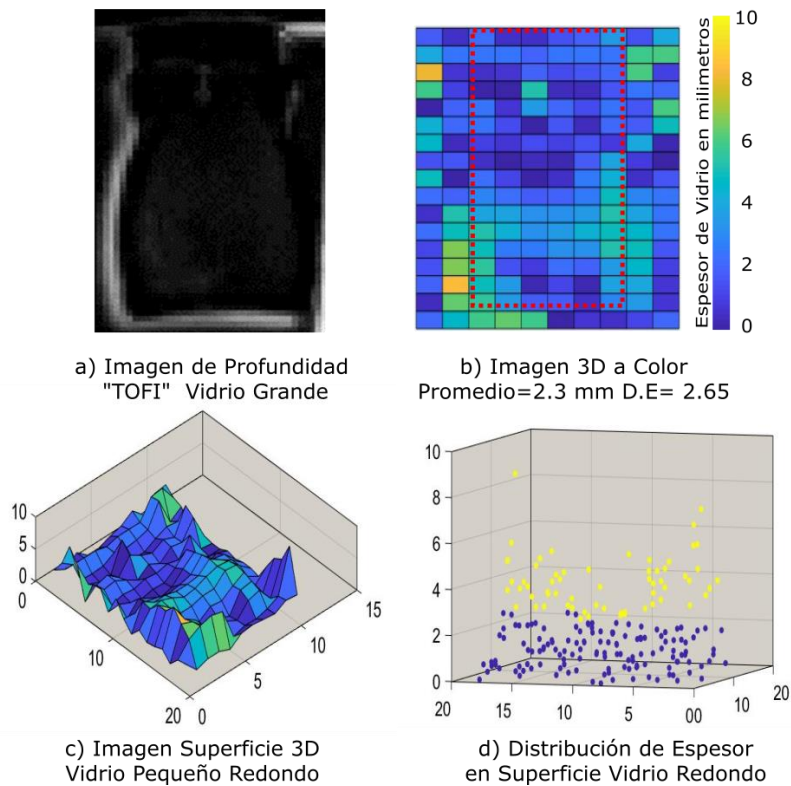
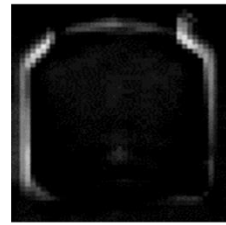
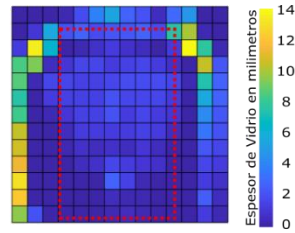


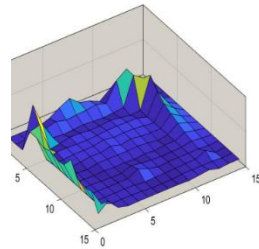
Figura 5-6 Evaluación de la metodología uno, aplicada a la superficie de un contenedor de vidrio transparente curvo grande



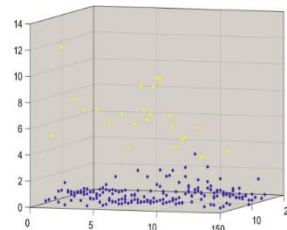
a) Imagen de Profundidad
"TOFID" Vidrio Mediano



b) Imagen 3D a Color
Promedio=1.6mm D.E= 1.9

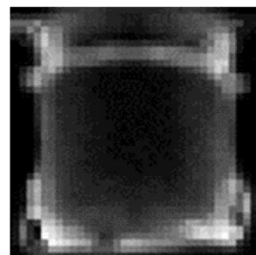


c) Imagen Superficie 3D
Vidrio Pequeño Redondo

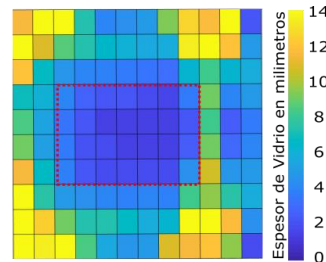


d) Distribución de Espesor
en Superficie Vidrio Redondo

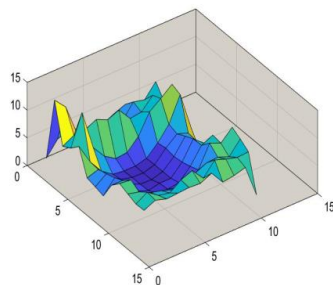
Figura 5-7 Evaluación de la metodología uno, aplicada a la superficie de un contenedor de vidrio transparente curvo mediano



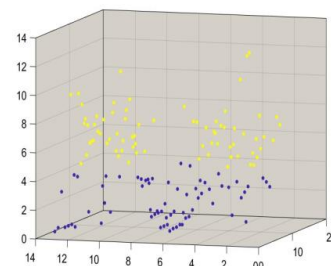
a) Imagen de Profundidad
"TOFID" Vidrio Pequeño



b) Imagen 3D a Color
Promedio=1.3 mm D.E= 3.3



c) Imagen Superficie 3D
Vidrio Pequeño Redondo



d) Distribución de Espesor
en Superficie Vidrio Redondo

Figura 5-8 Evaluación de la metodología uno, aplicada a la superficie de un contenedor de vidrio transparente curvo pequeño

5.3 Evaluación del modelo compuesto en la superficie de contenedores de vidrios planos transparentes

Para la evaluación del modelo compuesto y siguiendo la metodología propuesta, se realizaron las 80 adquisiciones continuas a las nueve muestras de vidrio plano transparente y posteriormente también se adquirieron nueve imágenes de profundidad a las muestras de color opaco con los mismos tamaños y espesores de los vidrios anteriores, una vez realizado el preprocesamiento a todas las imágenes adquiridas, se procedió a aplicar el modelo compuesto propuesto, el resultado obtenido se mostró mediante varias gráficas donde la intensidad y el color de la imagen se correlacionaron con el espesor de la muestra analizada. En la **figura 5-9 a** se observa la reconstrucción del espesor para una placa de vidrio plano transparente de 2 mm, la cual presenta una intensidad de color más homogéneo que los presentados con el modelo simple, el valor de la desviación estándar en la superficie del vidrio fue de 0.25, con un espesor promedio de 1.9 mm. En la **figura 5-9 b** se encuentra la misma información para un vidrio de 3 mm y así sucesivamente hasta llegar a la **figura 5-9 i**, donde se muestra la imagen con los datos para un vidrio plano transparente de 15 mm. Los resultados obtenidos de la reconstrucción de las muestras de vidrio plano transparente con el modelo compuesto tienen una menor desviación estándar (menos dispersión de los datos), lo cual se refleja en el valor promedio del espesor muy cercano al espesor real medido con el calibrador.

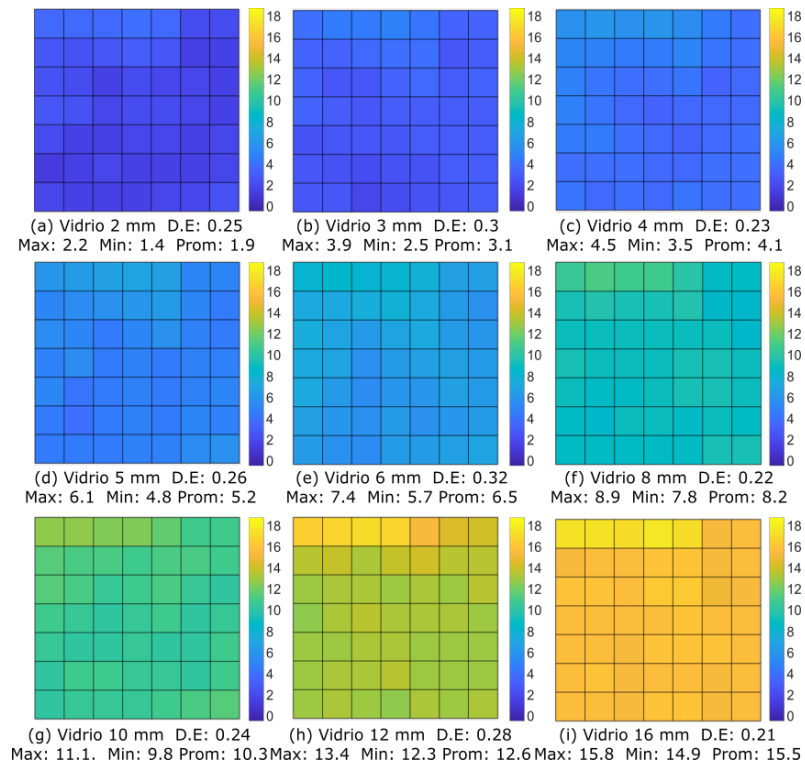


Figura 5-9 Evaluación de la metodología compuesta, aplicada a la superficie de nueve muestras de vidrio plano transparente con diferentes espesores

Para la segunda evaluación del modelo compuesto, se adquirieron nuevamente ochenta imágenes de profundidad simultáneas, esta vez a dos muestras de vidrio plano con 2 mm y 3 mm de espesor respectivamente **figura 5-10 a**), se observa una variación en la tonalidad del color: en la parte superior, en color azul, está representado el espesor de 2 mm y en la parte inferior en azul oscuro se representa el espesor de 3 mm. En la **figura 5-10 b**, se muestran los mismos valores, ahora en un formato 3D donde se aprecia un comportamiento en escala diferenciando el cambio de espesor. Para resaltar esta diferencia se utilizó también un clasificador *K-means* en los datos generados por la imagen de profundidad, el resultado se muestra en una gráfica de dispersión “nubes de puntos” **figura 5-10 c**, donde en amarillo se encuentran los puntos que representan el espesor de 3mm y en azul los puntos equivalentes a 2mm, en la gráfica se aprecia una clasificación de espesor con un comportamiento mucho mejor comparándolo con el modelo simple; en la **figura 5-10 d** se aprecian los mismos datos anteriores desde otro ángulo que permite observar la mejora en la clasificación del cambio de espesor en la superficie de los vidrios transparentes de 2 mm y 3 mm.

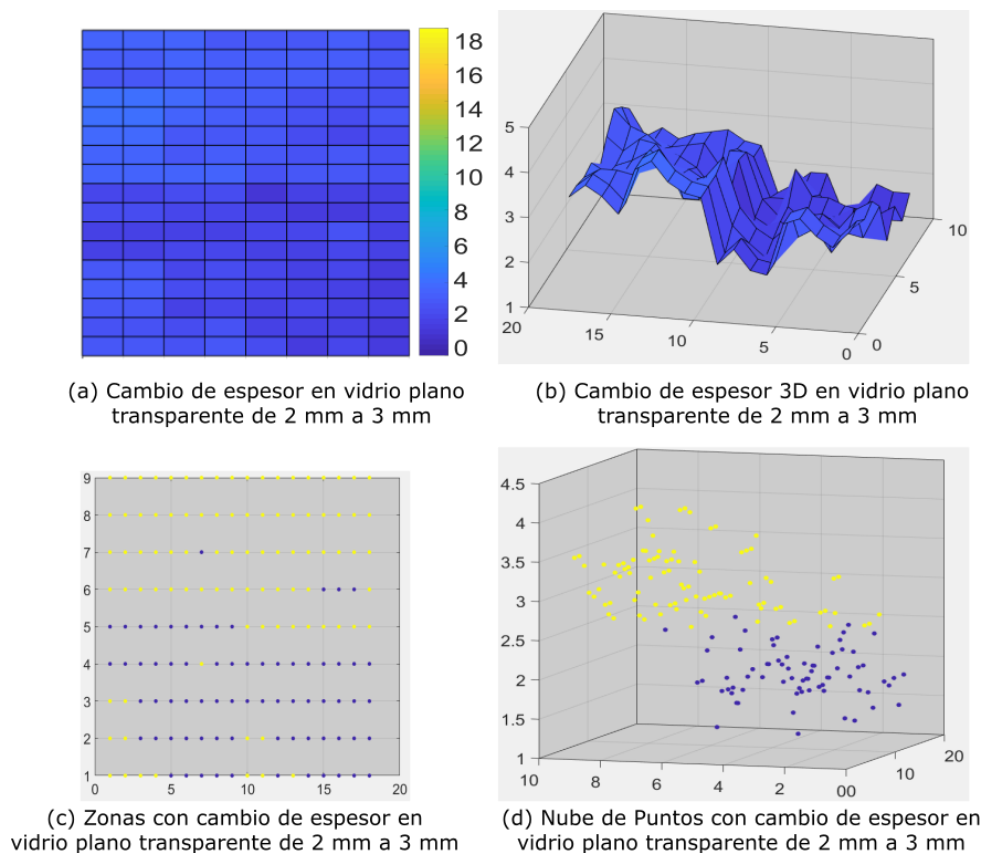


Figura 5-10 Evaluación de la metodología compuesta, aplicada a la superficie de una muestra de vidrio plano transparente la cual presenta un cambio de espesor de 2 mm a 3 mm

El mismo procedimiento se repitió esta vez utilizando dos muestras de vidrio plano con espesores de 5 mm y 6 mm respectivamente, el resultado se aprecia en la **figura 5-11 a**, donde se observa una variación en la tonalidad del color: en la parte superior el color azul claro representa el espesor de 5 mm, y en la parte inferior el azul más oscuro representa el espesor de 6 mm. En la **figura 5-11 b**, se muestra la imagen en 3D donde se aprecia el cambio de espesor en un comportamiento tipo escala, para identificar el cambio de espesor en la superficie del vidrio plano transparente se utilizó el mismo clasificador tipo clustering no supervisado *K-means* y fueron representados en una gráfica de dispersión “nubes de puntos”, el resultado se muestra en la **figura 5-11 c**, donde en amarillo están los puntos que representan el espesor de 5mm y en azul los puntos equivalentes a 6mm; la clasificación de espesor fue satisfactoria aunque aún con algunos puntos amarillos y azules mezclados. En la **figura 5-11 d** se aprecian los mismos datos anteriores, pero desde otro ángulo, mostrando una clasificación de espesor entre los vidrios planos de 5 mm y 6 mm.

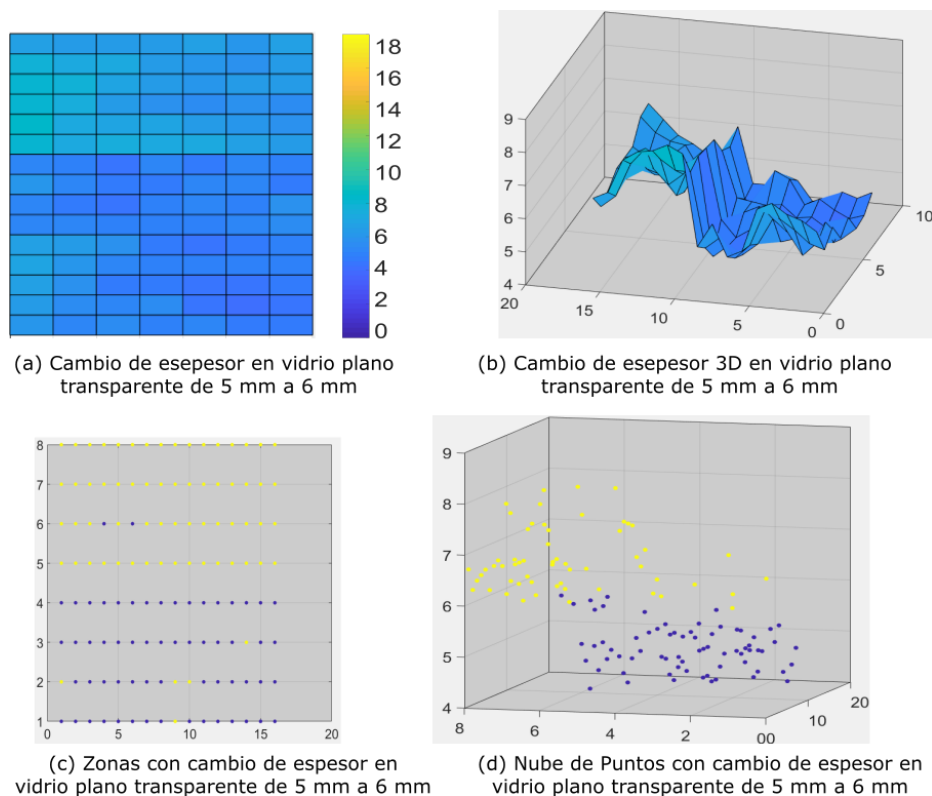


Figura 5-11 Evaluación de la metodología compuesta, aplicada a la superficie de una muestra de vidrio plano transparente la cual presenta un cambio de espesor de 2 mm a 3 mm

También se realizó el procedimiento con un cambio de espesor de 2mm, utilizando dos muestras de vidrio plano de 10 mm y 12 mm respectivamente, el resultado se aprecia en la en la **figura 5-12 a**, donde se observa una variación en la tonalidad bien definida del color: en la parte superior el color verde representando el espesor de 12 mm y en la parte inferior el

verde más claro representa el espesor de 10 mm. En la **figura 5-12 b**, se muestra la imagen en 3D en colores donde el resultado muestra una clara separación entre los dos espesores analizados; en la **figura 5-12 c** se encuentra la gráfica de dispersión en nubes de puntos, en amarillo se encuentran los puntos que representan el espesor de 12mm y en azul los puntos equivalentes a 10mm con una clasificación perfecta de los dos espesores; en la **figura 5-12 d**, se aprecian los mismos datos anteriores desde otro ángulo, mostrando una separación espacial 3D entre los vidrios planos de 10 mm y 12 mm analizados.

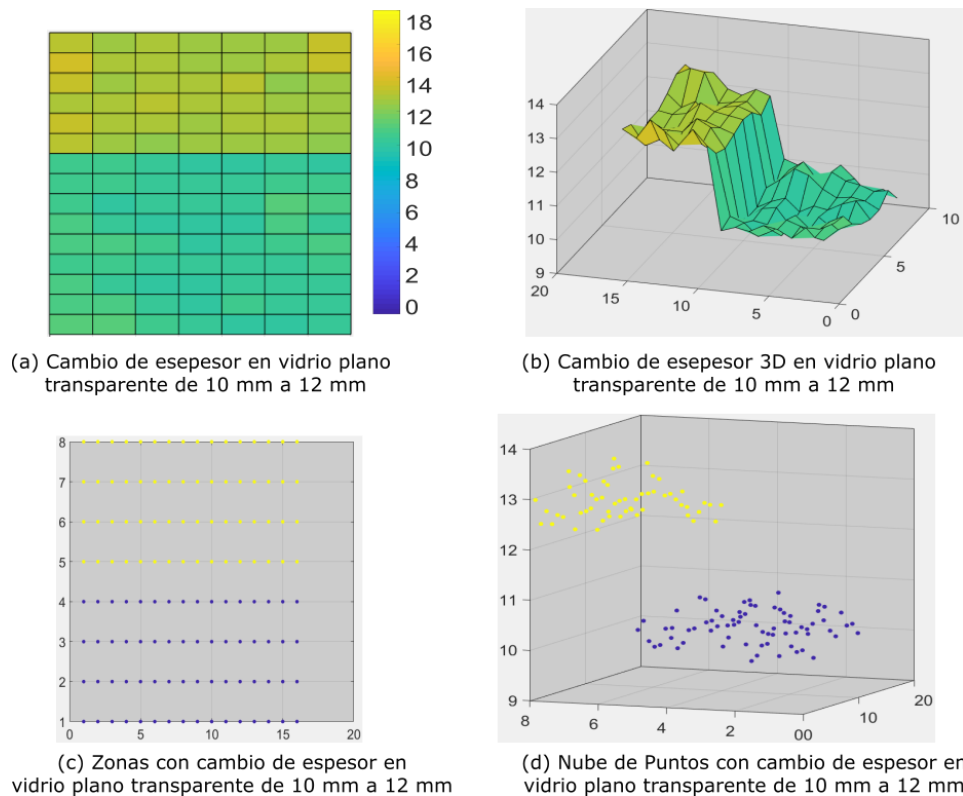


Figura 5-12 Evaluación de la metodología compuesta, aplicada a la superficie de una muestra de vidrio plano transparente la cual presenta un cambio de espesor de 10 mm a 12 mm

5.4 Evaluación del modelo compuesto en la superficie de contenedores curvos transparentes

La tercera evaluación del modelo compuesto se realizó en la superficie de los mismos tres contenedores de vidrio curvos transparentes medidos y analizados con el modelo simple, el procedimiento metodológico fue similar, con la diferencia que se reemplazó la imagen del background por las muestras opacas con la misma forma de los contenedores de vidrios, luego de la adquisiciones de las imágenes de profundidad se realizó el proceso de filtrado, y posteriormente se aplicó el modelo compuesto al recuadro que aparece en rojo sin incluir los

bordes del contenedor, el resultado obtenido se muestra en una imagen en 3D **figura 5-13 a**, luego para conocer el valor del espesor en la superficie del vidrio se relaciona por medio de una imagen de color donde se adiciona al lado derecho la escala de espesor en milímetros, como se muestra en la **figura 5-13 b**, el espesor obtenido con el modelo compuesto fue en promedio de 2.8 mm con una desviación estándar de 1.3 **figura 5-13 c** se aprecia la misma imagen desde un ángulo diferente, el cual permite observar la reconstrucción de la superficie curva del contenedor, por último en la **figura 5-13 d** se tiene una representación de la imagen anterior pero esta vez en nubes de puntos, para su análisis se aplicó nuevamente el clasificador tipo clustering “K-means”, en azul se observan los valores menores de 3 mm con mucha dispersión entre los datos. El procedimiento anterior se repitió luego para un contenedor de vidrio transparente con un tamaño mediano, en la **figura 5-14 a** se encuentra la imagen resultante en unidades digitales donde se observa la silueta del contenedor, en la **figura 5-14 b y c** se observa la imagen 3D a color después de aplicar el modelo dos indirecto, en los resultados se observa una medida promedio de 3.4mm y una desviación estándar mayor de 1.9, por último en la **figura 5-14 d** se encuentra la imagen en nubes de puntos después de correr el clasificador tipo clustering “K-means”, se observa una distribución de los datos mayor intensidad entre 2 mm y 3 mm. Finalmente se repitió todo el proceso anterior en un contenedor de vidrio con un tamaño pequeño, en la **figura 5-15 a** se observa la imagen en valores digitales del contenedor pequeño, en la **figura 5-15 b y c** se encuentra la imagen de 3D a color donde se observa una reconstrucción del contenedor con un promedio de espesor de 3.5mm y una desviación estándar de 1.3

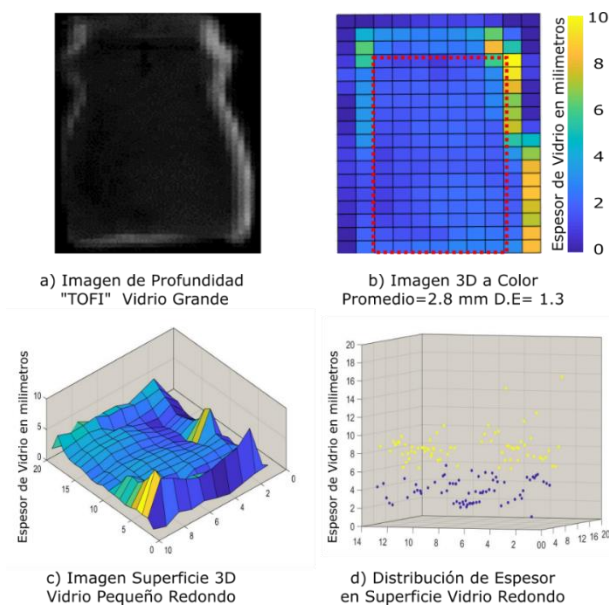


Figura 5-13 Evaluación de la metodología compuesta, aplicada a la superficie de un contenedor de vidrio transparente curvo grande

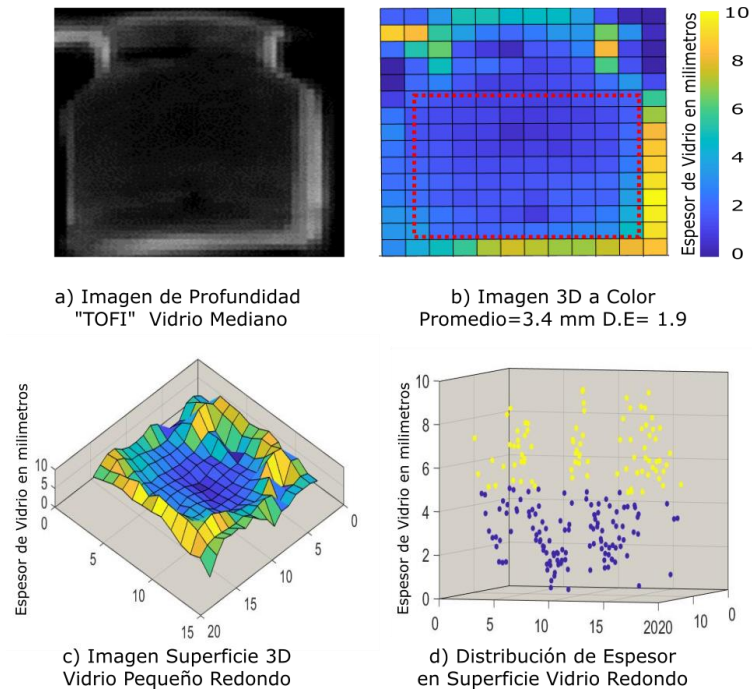


Figura 5-14 Evaluación de la metodología dos, aplicada a la superficie de un contenedor de vidrio transparente curvo mediano

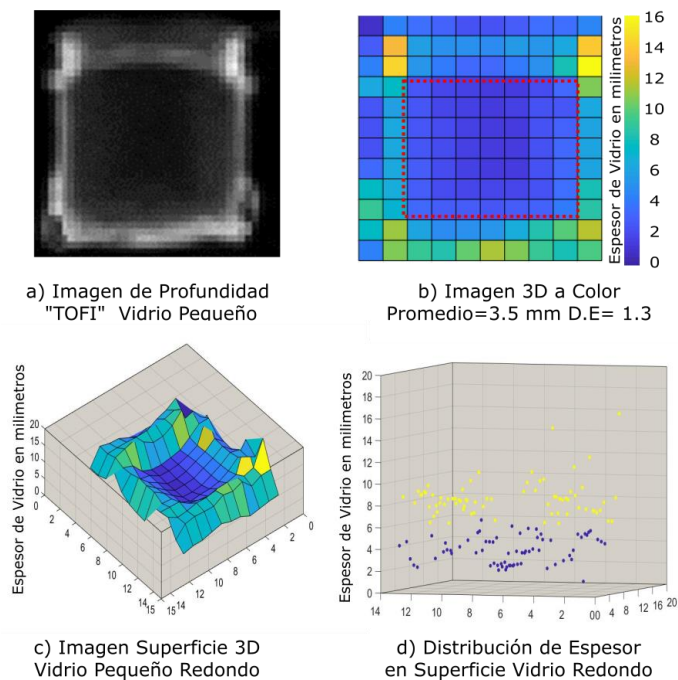


Figura 5-15 Evaluación de la metodología compuesta, aplicada a la superficie de un contenedor de vidrio transparente curvo pequeño

5.5 Análisis de resultados

Para la evaluación de las dos metodologías propuestas en la detección de cambio de espesor en superficies de vidrio transparente, se realizaron tres experimentaciones diferentes, a continuación se evalúan y comparan los resultados obtenidos.

En la primera validación se realizó la reconstrucción del espesor de nueve placas de vidrio plano transparente con diferentes espesores ubicadas en el centro espacial de la cámara, el resultado después de aplicar el modelo simple se observa en la figura 5-1, donde mediante la escala de color que representan el valor de profundidad, se obtuvo una dispersión muy alta en la superficie del vidrio y es respaldada por los valores máximo y mínimo que, en algunos casos como en el vidrio de 12 mm, es cercano a los 4mm. Con las observaciones anteriores se puede concluir que la técnica simple tiene una resolución muy baja, y se podrían realizar detección de cambios de espesor sólo mayores a 2 mm, mientras que el método compuesto con los mismos nueve vidrios arrojó valores de dispersiones más pequeños, por lo que es posible detectar cambios de espesor inclusive de un milímetro de diferencia como se aprecia en la figura 5-9.

La segunda experimentación consistió en realizar la adquisición de imágenes de profundidad a dos vidrios planos transparentes con diferentes espesor entre sí, (1 mm y 2 mm), el resultado en el modelo simple con diferencias de espesores de 1 mm se muestran en la figuras 5-2, 5-3 y 5-4, donde debido a la alta dispersión de los datos es difícil garantizar una correcta separación en el cambio de espesor, y aunque se observó que al aumentar los espesores de los dos vidrios (para el caso de 5 mm y 6 mm), mejora la identificación del cambio de espesor, en el cambio de espesor de 2 mm se observó una aceptable identificación entre las superficie de los vidrios, respaldando la conclusión anterior de que el modelo simple se aplica para cambios de espesor superiores a 2 mm. Para el modelo compuesto se observa en las gráficas 5-10, 5-11 y 5-12, que al tener menos dispersión de los datos es posible identificar un cambio de espesor hasta de 1 mm de diferencia en la superficie de vidrios planos transparentes con espesores delgados, respaldando también lo observado en la primera experimentación.

Para la tercera validación de los dos modelos propuestos, se realizó la adquisición de las imágenes de profundidad, en la superficie de tres contenedores con forma cilíndrica de diferentes tamaños, inicialmente se aplicó el modelo simple como se observa en las figuras 5-6, 5-7 y 5-8, aunque se logró una reconstrucción parcial del contenedor en la imagen c) de cada gráfica, los resultados de la identificación del espesor estuvieron poco precisos en gran parte causada por la alta dispersión en los datos; cuando se aplicó el modelo compuesto a los mismos contenedores se obtuvo en resultado más aproximado del espesor de la superficie del contenedor, aunque con menor resolución comparado con la detección de espesor en los vidrios planos

6. Conclusiones y Trabajo Futuro

En este capítulo se presentan las conclusiones generales y los resultados obtenidos luego de evaluar las dos metodologías propuestas para la detección del cambio de espesor en contenedores de vidrio transparente, también se evidencia algunas posibles mejoras y aplicaciones prácticas que se pueden derivar de esta tesis como trabajos futuros.

6.1 Conclusiones

El objetivo central de esta tesis fue proponer una metodología para la detección del cambio de espesor en una superficie extendida de los contenedores de vidrio transparente por medio de “Time of Flight distortion” a partir de imágenes de profundidad, la cámara utilizada para la adquisiciones de las imágenes fue la Kinect V2, que a pesar de ser un cámara diseñada inicialmente para el dispositivo de juegos Xbox One, cuenta con grades prestaciones en velocidad y comunicación. En el desarrollo de las experimentaciones y debido a la limitante de resolución presentada inicialmente con la metodología simple, se implementó una segunda metodología llamada compuesta la cual pudo duplicar la resolución inicial y mostrar resultados con una precisión de hasta un milímetro de espesor en la superficie de los contenedores de vidrio plano transparente

La finalidad práctica de este trabajo de tesis no es competir con las técnicas actuales de detección de espesor en vidrios transparentes, las cuales cuentan con muy altas resoluciones en la detección del espesor (como las técnicas que trabajan con interferometría), la idea es complementar los sistemas de medición de espesor en vidrios planos transparentes, ya que mediante esta metodología se puede monitorear un área extendida del vidrio, y se puede dar una alarma temprana a los sistemas de detección de fallas de espesor, con la ventaja adicional de ser una tecnología muy asequible económicamente para la mediana y pequeña industria.

Una de las desventajas de la metodología propuesta para contenedores de vidrio con geometría curva, es que la prueba es destructiva, ya que sólo se puede medir una de las superficies del contenedor de vidrio a la vez, por esto se debe separar la cara del contenedor que se desea analizar. Sería interesante experimentar con algún producto al interior del contenedor que permitiera adquirir las imágenes de una de las superficies sin tener que destruir el envase.

Aunque con el modelo simple y compuesto se lograron obtener unas reconstrucciones aceptables de la superficie de los contenedores de vidrio curvo, por medio de las imágenes 3D a color, sigue existiendo una dispersión alta en los datos que limitan la precisión del valor medido del espesor real de la cara del contenedor.

6.2 Trabajos Futuros

Las metodologías simple y compuesta propuestas en esta tesis, están basadas en las cámaras de profundidad que trabajan con la técnica “Time of Flight”, para nuestro caso utilizamos el Kinect V2 de Microsoft, por tal motivo la resolución máxima obtenida fue hasta de 1 mm, pero esta resolución es factible de mejoras sólo con reemplazar la cámara de adquisición con otra que trabaje con la misma técnica, pero que cuente con una mejor resolución con cambios mínimos en la metodología propuesta.

La medición del espesor en los vidrios transparentes mediante la técnica “Time of Flight” está directamente relacionada con el índice de refracción del vidrio, [41], [42] es por esto que un posible campo de investigación relacionado de este trabajo, se encuentre en la detección del índice de refracción no sólo de un objeto sólido como el vidrio, el acrílico o algunos poliéster translúcidos, sino también en líquidos translucidos como el glicol, el ACPM o la gasolina con la ventaja de poder analizar cambios en el índice de refracción en un área extendida de la sustancia analizada, también se puede utilizar para la detección de formación de hielo en zonas con poca luz o con accesos difíciles como el trabajo de [43], [44].

7. Bibliografía

- [1] Peng, X., & Li, X. (2015). An online glass medicine bottle defect inspection method based on machine vision. *Glass Technology-European Journal of Glass Science and Technology Part A*, 56(3), 88-94.
- [2] Foglia, P., Prete, C. A., & Zanda, M. (2015). An inspection system for pharmaceutical glass tubes.
- [3] Li-Li, Z., Yan-Hua, W., Xue-Feng, Z., & Hong-Yu, L. (2013, July). Implementation of a Novel LED Backlight Device Used for Glass Bottle Detection. In *2013 Seventh International Conference on Image and Graphics* (pp. 766-769). IEEE.
- [4] Sirlin, E. (2006). *La luz en el teatro: manual de iluminación*. Inteatro, Instituto Nacional del Teatro.
- [5] Figueras Atienza, M. (2006). *Óptica geométrica La óptica sin ondas*.
- [6] Zeman, C., & Antonio, V. (2012). *Constructive interference for Multi-view Time-of-Flight acquisition* (Doctoral dissertation, Technische Universität München).
- [7] Madrigal, C. A., Branch, J. W., Restrepo, A., & Mery, D. (2017). A method for automatic surface inspection using a model-based 3D descriptor. *Sensors*, 17(10), 2262.
- [8] Dal Mutto, C., Zanuttigh, P., & Cortelazzo, G. M. (2012). *Time-of-flight cameras and Microsoft Kinect™*. Springer Science & Business Media.
- [9] Giancola, S., Valenti, M., & Sala, R. (2018). *A survey on 3D cameras: Metrological comparison of time-of-flight, structured-light and active stereoscopy technologies*. Springer Nature.
- [10] De Groot, P. J. (2019). A review of selected topics in interferometric optical metrology. *Reports on Progress in Physics*, 82(5), 056101.
- [11] Zanuttigh, P., Marin, G., Dal Mutto, C., Dominio, F., Minto, L., & Cortelazzo, G. M. (2016). Time-of-flight and structured light depth cameras. *Technology and Applications*, 978-3.
- [12] Bamji, C. S., O'Connor, P., Elkhatib, T., Mehta, S., Thompson, B., Prather, L. A., ... & Chan, V. H. (2014). A 0.13 μm CMOS system-on-chip for a 512×424 time-of-flight image sensor with multi-frequency photo-demodulation up to 130 MHz and 2 GS/s ADC. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 50(1), 303-319.
- [13] Rahman, M. (2017). *Beginning Microsoft Kinect for Windows SDK 2.0: Motion and Depth Sensing for Natural User Interfaces*. Apress.
- [14] Payne, A., Daniel, A., Mehta, A., Thompson, B., Bamji, C. S., Snow, D., ... & Xu, Z. (2014, February). 7.6 a 512×424 cmos 3d time-of-flight image sensor with multi-frequency photo-demodulation up to 130mhz and 2gs/s adc. In *2014 IEEE International*

- Solid-State Circuits Conference Digest of Technical Papers (ISSCC) (pp. 134-135). IEEE.
- [15] Yang, L., Zhang, L., Dong, H., Alelaiwi, A., & El Saddik, A. (2015). Evaluating and improving the depth accuracy of Kinect for Windows v2. *IEEE Sensors Journal*, 15(8), 4275-4285.
- [16] Butkiewicz, T. (2014, September). Low-cost coastal mapping using Kinect v2 time-of-flight cameras. In *2014 Oceans-St. John's* (pp. 1-9). IEEE.
- [17] Li, L. (2014). Time-of-flight camera—an introduction. Technical white paper, (SLOA190B).
- [18] Hong, S., Saavedra, G., & Martinez-Corral, M. (2016). Full parallax three-dimensional display from Kinect v1 and v2. *Optical Engineering*, 56(4), 041305.
- [19] Bansal, N. P., & Doremus, R. H. (2013). *Handbook of glass properties*. Elsevier.
- [20] Liu, H., & Wang, Y. (2008, December). Development of glass bottle inspector based on machine vision. In *2008 10th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision* (pp. 785-790). IEEE.
- [21] Ni, Y., & Yu-tian, W. (2008, October). Novel Float Glass Thickness Measurement based on Image Processing. In *2008 International Symposium on Computational Intelligence and Design* (Vol. 2, pp. 94-97). IEEE.
- [22] Ni, Y., Yu-tian, W., Xiao-lin, L., Jiang-tao, L., & Zhao, P. (2008, August). Study on a novel laser measurement system for float glass thickness. In *2008 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation* (pp. 179-184). IEEE.
- [23] Weng, C. J., Lu, B. R., Cheng, P. Y., Hwang, C. H., & Chen, C. Y. (2017, May). Measuring the thickness of transparent objects using a confocal displacement sensor. In *2017 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)* (pp. 1-5). IEEE.
- [24] Donati, S., Martini, G., & Fathi, M. T. (2011, October). Self-mix interferometer to measure transparent plates thickness and index of refraction. In *SENSORS, 2011 IEEE* (pp. 1382-1385). IEEE.
- [25] Na, J., Choi, W. J., Choi, H. Y., Ryu, S. Y., Choi, E. S., & Lee, B. H. (2009). Thickness and refractive index measurements by full-field optical coherence microscopy. *IEEE Sensors Journal*, 9(12), 1996-1997.
- [26] Kim, S., Na, J., Kim, M. J., & Lee, B. H. (2008). Simultaneous measurement of refractive index and thickness by combining low-coherence interferometry and confocal optics. *Optics express*, 16(8), 5516-5526.
- [27] Kim, Y., Hibino, K., Sugita, N., & Mitsuishi, M. (2015). Measurement of optical thickness variation of BK7 plate by wavelength tuning interferometry. *Optics express*, 23(17), 22928-22938.

- [28] Li, Y., Yang, Y., Xia, X., Gao, L., Cong, H., & Wang, C. (2009, August). The method for dual-beam laser heterodyne ultra-precision measurement of the glass thickness. In Conference on Lasers and Electro-Optics/Pacific Rim (p. TuE1_4). Optical Society of America
- [29] Kim, J. A., Kim, J. W., Eom, T. B., Jin, J., & Kang, C. S. (2014). Vibration-insensitive measurement of thickness variation of glass panels using double-slit interferometry. *Optics express*, 22(6), 6486-6494.
- [30] Wang, C. H., Li, Y. C., Gao, L., & Pang, Y. J. (2011, October). A method of second harmonic measuring glass thickness with ultra-precision based on multi-beam laser heterodyne. In 2011 Academic International Symposium on Optoelectronics and Microelectronics Technology (pp. 236-239). IEEE.
- [31] He, B., Cabestaing, F., Postaire, J. G., & Zhang, R. (2005). Narrow-band frequency analysis for laser-based glass thickness measurement. *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, 54(1), 222-227.
- [32] Corti, A., Giancola, S., Mainetti, G., & Sala, R. (2016). A metrological characterization of the Kinect V2 time-of-flight camera. *Robotics and Autonomous Systems*, 75, 584-594.
- [33] Yang, L., Zhang, L., Dong, H., Alelaiwi, A., & El Saddik, A. (2015). Evaluating and improving the depth accuracy of Kinect for Windows v2. *IEEE Sensors Journal*, 15(8), 4275-4285.
- [34] Lachat, E., Macher, H., Mittet, M. A., Landes, T., & Grussenmeyer, P. (2015). First experiences with Kinect v2 sensor for close range 3D modelling. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40(5), 93.
- [35] Bhandari, A., Feigin, M., Izadi, S., Rhemann, C., Schmidt, M., & Raskar, R. (2014, November). Resolving multipath interference in kinect: An inverse problem approach. In *SENSORS, 2014 IEEE* (pp. 614-617). IEEE.
- [36] Mezher, L. S. (2016). Digital Image Processing Filtering with LABVIEW. *International Journal of Computer Science Trends and Technology (I JCS T)*, 278.
- [37] Mallick, T., Das, P. P., & Majumdar, A. K. (2014). Characterizations of noise in Kinect depth images: A review. *IEEE Sensors journal*, 14(6), 1731-1740.
- [38] Saygili, G., Van Der Maaten, L., & Hendriks, E. A. (2014, August). Hybrid kinect depth map refinement for transparent objects. In 2014 22nd International Conference on Pattern Recognition (pp. 2751-2756). IEEE.
- [39] Tanaka, K., Mukaigawa, Y., Kubo, H., Matsushita, Y., & Yagi, Y. (2016). Recovering transparent shape from time-of-flight distortion. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 4387-4395).

- [40] Shim, H., & Lee, S. (2015). Recovering translucent objects using a single time-of-flight depth camera. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 26(5), 841-854.
- [41] Schröder, U., & Schuster, T. (2016). An iterative method to reconstruct the refractive index of a medium from time-of-flight measurements. *Inverse Problems*, 32(8), 085009.
- [42] Ma, C., Lin, X., Suo, J., Dai, Q., & Wetzstein, G. (2014). Transparent object reconstruction via coded transport of intensity. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 3238-3245).
- [43] Abdalla, Y. E., Iqbal, M. T., & Shehata, M. (2017, April). Black Ice detection system using Kinect. In *2017 IEEE 30th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)* (pp. 1-4). IEEE.
- [44] Lee, H., Kang, M., Song, J., & Hwang, K. (2020). The detection of black ice accidents for preventative automated vehicles using convolutional neural networks. *Electronics*, 9(12), 2178.
- [45] Lee, S., & Shim, H. (2015). Skewed stereo time-of-flight camera for translucent object imaging. *Image and Vision Computing*, 43, 27-38.
- [46] Sell, J., & O'Connor, P. (2014). The xbox one system on a chip and kinect sensor. *IEEE Micro*, 34(2), 44-53.
- [47] Jayasuriya, S., Pediredla, A., Sivaramakrishnan, S., Molnar, A., & Veeraraghavan, A. (2015, October). Depth fields: Extending light field techniques to time-of-flight imaging. In *2015 International Conference on 3D Vision* (pp. 1-9). IEEE.
- [48] Liu, H., & Wang, Y. (2008, December). Development of glass bottle inspector based on machine vision. In *2008 10th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision* (pp. 785-790). IEEE.