



Institución Universitaria

# **Caracterización de los cambios en las películas plásticas multicapa en procesos de termodeformación usando fotoelasticidad digital**

**Fernando Meléndez Lozada**

Instituto Tecnológico Metropolitano

Facultad de Ingeniería

Medellín, Colombia

2017



# **Caracterización de los cambios en las películas plásticas multicapa en procesos de termodeformación usando fotoelasticidad digital**

**Fernando Meléndez Lozada**

Proyecto de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:

**Magíster en Automatización y Control Industrial**

Director:

Ph.D en Ingeniería

Alejandro Restrepo Martínez

Codirector:

Ph.D en Física

Francisco Eugenio López Giraldo

Línea de Investigación:

Visión Artificial y Fotónica

Grupo de Investigación:

Automática, Electrónica y Ciencias Computacionales

Instituto Tecnológico Metropolitano

Facultad de Ingenierías

Medellín, Colombia

2017



## *Dedicatoria*

*A Dios por brindarme salud y oportunidades de  
mejorar como ser humano,  
a mi familia por el acompañamiento, amor y  
apoyo infinito.*



## **Agradecimientos**

A mi esposa Victoria Andrea Mira, familia, amigos y compañeros de trabajo por su apoyo moral

Al Instituto Tecnológico Metropolitano por facilitar su infraestructura para el desarrollo experimental de los objetivos de este trabajo.

A Juan Carlos Briñez, Alejandro Restrepo y Francisco López por disponer toda su experiencia y voluntad a favor de mi formación como investigador.

Y por último y no menos importante a los profesionales que aportaron su conocimiento como son: Julián Peláez, Mauricio Arias, María Constanza Torres, Edilson Delgado, Nelson Gómez y Milena Taborda.



## Resumen

Este trabajo propone una metodología para la caracterización de los cambios en secuencias de imágenes de fotoelasticidad. Las películas plásticas multicapa fueron deformadas a diferentes temperaturas (20°C y 60°C). El análisis de la variación se observó en un polariscopio plano ya que las muestras presentan comportamiento birrefringente lo que genera colores de interferencia en las imágenes capturadas. La evolución temporal de intensidades de color se analizaron usando métricas de similitud, demodulación del color, desplazamiento de fase, algoritmos de aprendizaje del color-espesor y mapa de esfuerzos. Se encontró que las películas presentan cambios en el retardo de fase, espesor y esfuerzo, así la fotoelasticidad describe variaciones espaciales y temporales no homogéneas sobre la superficie de las muestras analizadas.

**Palabras clave:** *Fotoelasticidad dinámica, Demodulación de colores de interferencia, Película plástica multicapa, Desplazamiento de fase*

## Abstract

This paper proposes a methodology for the characterization of the temporal behavior of photoelasticity image sequences. The multilayer plastic films were deformed at different temperatures (20°C y 60°C). The analysis of the variation was observed in a plane polariscope because the specimen present birefringent behavior which generates colors of interference in the images captured. The evolution temporal intensities were analyzed using similarity metrics, color demodulation, phase shifting, color-thickness learning algorithms and stress maps. It was found that the films show changes in phase retardation, thickness and stress, thus the photoelasticity describes non-homogeneous spatial and temporal variations on the surface of the specimens analyzed.

**Keywords:** *Dynamic photoelasticity, Demodulation of interference colors, Multilayer plastic film, Phase shifting*

# Contenido

	Pág.
<b>Resumen .....</b>	<b>IX</b>
<b>Lista de figuras.....</b>	<b>XIV</b>
<b>Lista de tablas .....</b>	<b>XVIII</b>
<b>1. Introducción .....</b>	<b>21</b>
1.1 Antecedentes y justificación .....	21
1.2 Planteamiento y delimitación del problema.....	22
1.3 Objetivos .....	25
1.3.1 Objetivo general .....	25
1.3.2 Objetivos específicos .....	25
1.4 Hipótesis .....	25
<b>2. Marco Teórico y Estado del Arte .....</b>	<b>27</b>
2.1 Introducción.....	27
2.2 Marco teórico .....	27
2.2.1 Procesos y propiedades mecánicas de las películas plásticas multicapa .....	28
2.2.2 Procesos y propiedades ópticas de las películas plásticas multicapa .	31
2.2.3 Procesos computacionales .....	40
2.3 Estado del Arte.....	49
<b>3. Desarrollo Experimental.....</b>	<b>55</b>
3.1 Metodología .....	55
3.2 Montaje del sistema de fotoelasticidad digital y termodeformación .....	57
3.2.1 Selección de equipos de adquisición .....	58

3.2.2	Ajuste de color del sistema de adquisición .....	65
3.2.3	Medición del espectro emitido por la fuente de luz. ....	70
3.2.4	Estabilidad de color .....	71
3.2.5	Distribución de temperatura en la región de interés .....	72
3.3	Adquisición de videos de fotoelasticidad .....	74
<b>4.</b>	<b>Resultados .....</b>	<b>77</b>
4.1.1	Análisis de resultados .....	79
4.1.2	Conclusión .....	79
4.2	Correlación digital de imágenes.....	80
4.2.1	Evolución de intensidad .....	80
4.2.2	Resultados y discusión .....	81
4.2.3	Conclusión .....	90
4.3	Generación imagen sintética .....	90
4.3.1	Análisis.....	95
4.3.2	Conclusión .....	95
4.4	Generación imagen envuelta .....	95
4.4.1	Análisis.....	97
4.4.2	Conclusión .....	97
4.5	Generación de imagen desenvuelta .....	97
4.5.1	Análisis.....	99
4.5.2	Conclusión .....	99
4.6	Efecto de iluminación.....	99
4.6.1	Análisis.....	102
4.6.2	Conclusión .....	102
4.7	Selección de imagen sintética .....	102
4.7.1	Análisis.....	105
4.7.2	Conclusión .....	105
4.8	Demodulación de color y retardo de fase .....	105
4.8.1	Generación imagen de retardos de fase.....	108
4.8.2	Análisis.....	110
4.8.3	Conclusión .....	111
4.9	Estimación espesor por ANFIS.....	111
4.9.1	Selección función de pertenencia de la ANFIS.....	115

---

4.9.2	Generación imagen de espesores .....	117
4.9.3	Análisis .....	122
4.9.4	Conclusión.....	122
4.10	Cuantificación de los cambios de intensidad .....	123
4.10.1	Análisis .....	125
4.10.2	Conclusión.....	126
4.11	Evolución del espesor estimado .....	126
4.11.1	Análisis .....	131
4.11.2	Conclusión.....	131
4.12	Generación de mapa de esfuerzos .....	132
4.12.1	Análisis .....	138
4.12.2	Conclusión.....	139
4.13	Evaluación de imágenes .....	139
4.13.1	Análisis .....	151
4.13.2	Conclusión.....	152
<b>5.</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>155</b>
5.1	Conclusiones.....	155
5.2	Recomendaciones .....	158
<b>A.</b>	<b>Anexo: Código en Matlab generador de imágenes sintéticas.....</b>	<b>159</b>
<b>B.</b>	<b>Anexo: Código en Matlab de envolvimiento de fase .....</b>	<b>163</b>
<b>C.</b>	<b>Anexo: Código en Matlab de cuantificación de cambios de intensidad.....</b>	<b>167</b>
<b>D.</b>	<b>Anexo: Código en Matlab de generación imagen de espesores.....</b>	<b>168</b>
<b>E.</b>	<b>Anexo: Código en Matlab de la evolución del espesor .....</b>	<b>171</b>
<b>F.</b>	<b>Anexo: Código en Matlab de generación imagen retardo de fase .....</b>	<b>173</b>
<b>G.</b>	<b>Anexo: Código en Matlab de generación imagen de esfuerzos.....</b>	<b>176</b>
	<b>Bibliografía .....</b>	<b>177</b>

## Lista de figuras

<b>Figura 1-1.</b> Focos teóricos del planteamiento del problema .....	23
<b>Figura 2-1.</b> Mapa conceptual del marco teórico.....	28
<b>Figura 2-2.</b> Esquema del proceso de termoformado por vacío.....	29
<b>Figura 2-3.</b> Curva típica de Fuerza vs Deformación de Película Plástica .....	30
<b>Figura 2-4.</b> Birrefringencia.....	32
<b>Figura 2-5.</b> Luz polarizada linealmente pasando a través de un material a tensión .....	33
<b>Figura 2-6.</b> Polariscope Plano .....	35
<b>Figura 2-7.</b> Polariscope circular.....	37
<b>Figura 2-8.</b> Modelo de color RGB .....	38
<b>Figura 2-9.</b> Modelo de color HSI .....	39
<b>Figura 2-10.</b> Modelo de color CIELab .....	40
<b>Figura 2-11.</b> Proceso de reconocimiento de patrones .....	41
<b>Figura 2-12.</b> Histograma de una imagen.....	43
<b>Figura 2-13.</b> Criterio de extracción de características para transformaciones lineales....	47
<b>Figura 3-1.</b> Diagrama de la metodología y sus procesos experimentales. ....	56
<b>Figura 3-2.</b> Esquema general del montaje de fotoelasticidad digital con carga térmica. Fuente: Propia .....	57
<b>Figura 3-3.</b> Fotografía del montaje de fotoelasticidad digital con carga térmica .....	58
<b>Figura 3-4.</b> Factores para determinación del montaje de adquisición de video. (Fuente: propia).....	59
<b>Figura 3-5.</b> Imagen de Cámara RGB Color USB 1/2.5" .....	61
<b>Figura 3-6.</b> Lente de foco fijo de FL=8.5 mm .....	61

<b>Figura 3-7.</b> Imagen de dinamómetro para ensayos de tracción .....	63
<b>Figura 3-8.</b> Imagen de Pistola de Aire Caliente 50-600°C .....	64
<b>Figura 3-9.</b> Micrómetro resolución 2.54µm.....	64
<b>Figura 3-10.</b> Espectrómetro.....	65
<b>Figura 3-11.</b> Esquema de montaje para experimento calibración del color .....	66
<b>Figura 3-12.</b> Fotografía de montaje para experimento calibración del color.....	67
<b>Figura 3-13.</b> Ajustes de parámetros de color de la cámara .....	67
<b>Figura 3-14.</b> Imágenes adquiridas con diferentes ajustes de color de la cámara.....	68
<b>Figura 3-15.</b> Imagen calibrada seleccionada y posterior ajuste del blanco.....	69
<b>Figura 3-16.</b> Parámetros ajustados finales de la Cámara.....	69
<b>Figura 3-17.</b> Puntos de medición de la fuente de luz.....	70
<b>Figura 3-18.</b> Medición del espectro en los puntos P5 y P8.....	70
<b>Figura 3-19.</b> Puntos de medición de análisis de estabilidad de color.....	71
<b>Figura 3-20.</b> Variación de intensidad de los puntos P1 al P16 en el tiempo.....	72
<b>Figura 3-21.</b> Región de interés ROI del calentamiento de la película.....	73
<b>Figura 3-22.</b> Perfil de Temperatura del ROI en °C.....	73
<b>Figura 3-23.</b> Dimensiones de la película probeta.....	74
<b>Figura 3-24.</b> Área de recorte de la imagen adquirida.....	75
<b>Figura 4-1.</b> Curva de Fuerza vs Tiempo en deformaciones a 20°C y 60°C .....	77
<b>Figura 4-2.</b> Procesos del experimento .....	80
<b>Figura 4-3.</b> Ubicación de tres puntos de medición de evolución de intensidad en el ROI81	
<b>Figura 4-4.</b> Gráfica de correlación del canal rojo para deformación a 20°C y 60°C.....	82
<b>Figura 4-5.</b> Gráfica de correlación del canal verde para deformación a 20°C y 60°C.....	83
<b>Figura 4-6.</b> Gráfica de correlación del canal azul para deformación a 20°C y 60°C .....	83
<b>Figura 4-7.</b> Gráfica de correlación del canal rojo en video completo para deformación a 20°C y 60°C .....	85
<b>Figura 4-8.</b> Gráfica de correlación del canal verde en video completo para deformación a 20°C y 60°C .....	85
<b>Figura 4-9.</b> Gráfica de correlación del canal azul en video completo para deformación a 20°C y 60°C .....	86
<b>Figura 4-10.</b> Gráfica de evolución de intensidad en el punto 1 del ROI a T=20°C.....	87
<b>Figura 4-11.</b> Gráfica de evolución de intensidad en el punto 1 del ROI a T=60°C.....	87
<b>Figura 4-12.</b> Gráfica de evolución de intensidad en el punto 2 del ROI a T=20°C.....	88
<b>Figura 4-13.</b> Gráfica de evolución de intensidad en el punto 2 del ROI a T=60°C.....	88

<b>Figura 4-14.</b> Gráfica de evolución de intensidad en el punto 3 del ROI a $T=20^{\circ}\text{C}$ .....	89
<b>Figura 4-15.</b> Gráfica de evolución de intensidad en el punto 3 del ROI a $T=60^{\circ}\text{C}$ .....	89
<b>Figura 4-16.</b> Espectro de color CIE1931-2012.....	92
<b>Figura 4-17.</b> Espectro imagen sintética de colores de interferencia sin ajuste. ....	93
<b>Figura 4-18.</b> Espectro imagen sintética de colores de interferencia con ajuste de gamma .....	94
<b>Figura 4-19.</b> Imagen sintética de colores de interferencia. ....	94
<b>Figura 4-20.</b> Imágenes sintéticas con $0$ , $\pi/4$ , $\pi/2$ y $3\pi/4$ de desfase respectivamente ...	96
<b>Figura 4-21.</b> Imágenes sintéticas desfasadas en escala de grises.....	96
<b>Figura 4-22.</b> Imagen envuelta, eje x es el retardo en nm.....	96
<b>Figura 4-23.</b> Imagen desenvuelta, eje x corresponde al retardo de fase .....	97
<b>Figura 4-24.</b> Imagen desenvuelta, la barra de intensidades correspondientes a los órdenes .....	98
<b>Figura 4-25.</b> Imagen envuelta desde $0$ a $\pi$ .....	98
<b>Figura 4-26.</b> Imagen desenvuelta por UnwrapJ .....	98
<b>Figura 4-27.</b> Imagen envuelta desde $-\pi$ a $\pi$ .....	98
<b>Figura 4-28.</b> Imagen desenvuelta por UnwrapJ .....	98
<b>Figura 4-29.</b> Imágenes resultantes del ajuste del Gamma .....	99
<b>Figura 4-30.</b> Estructura del modelo ANFIS .....	100
<b>Figura 4-31.</b> Grafica de conjunto de datos vs salida [retardo nm] .....	100
<b>Figura 4-32.</b> Grafica de evolución del error de entrenamiento.....	101
<b>Figura 4-33.</b> Grafica de salida de entrenamiento contra la salida evaluada con los datos de prueba.....	101
<b>Figura 4-34.</b> Imagen real, <i>frame</i> 150, video 1, deformación a $T=20^{\circ}\text{C}$ .....	103
<b>Figura 4-35.</b> Imágenes sintético-reales .....	103
<b>Figura 4-36.</b> Dimensiones y ubicación del recuadro de mediciones .....	112
<b>Figura 4-37.</b> Fotografía de recuadro dibujado en la PPMC .....	112
<b>Figura 4-38.</b> Puntos de medición en el recuadro .....	113
<b>Figura 4-39.</b> Curva de Error de aprendizaje ANFIS vs Épocas .....	117
<b>Figura 4-40.</b> Prueba de Aprendizaje .....	117
<b>Figura 4-41.</b> Mapa de color tipo escala de grises. ....	124
<b>Figura 4-42.</b> Selección de ubicación de ventanas para evolución del espesor .....	126
<b>Figura 4-43.</b> Espesor en escala de grises.....	127

<b>Figura 4-44.</b> Mapa de evolución del espesor en escala de grises, posición: 225, video 2 y T=20°C .....	127
<b>Figura 4-45.</b> Evolución del espesor en el pixel (94,225), video 2, T=20°C .....	127
<b>Figura 4-46.</b> Mapa de evolución del espesor en escala de grises, posición: 600, video 2 y T=20°C .....	128
<b>Figura 4-47.</b> Evolución del espesor en el pixel (94,600), video 2, T=20°C .....	128
<b>Figura 4-48.</b> Mapa de evolución del espesor en escala de grises, posición: 1100, video 2 y T=20°C .....	128
<b>Figura 4-49.</b> Evolución del espesor en el pixel (94,1100), video 2, T=20°C .....	128
<b>Figura 4-50.</b> Mapa de evolución del espesor en escala de grises, posición: 225, video 2 y T=60°C .....	129
<b>Figura 4-51.</b> Evolución del espesor en el pixel (94,225), video 2, T=60°C .....	129
<b>Figura 4-52.</b> Mapa de evolución del espesor en escala de grises, posición: 600, video 2 y T=60°C .....	129
<b>Figura 4-53.</b> Evolución del espesor en el pixel (94,600), video 2, T=60°C .....	130
<b>Figura 4-54.</b> Mapa de evolución del espesor en escala de grises, posición: 1100, video 2 y T=60°C .....	130
<b>Figura 4-55.</b> Evolución del espesor en el pixel (94,1100), video 2, T=60°C .....	130
<b>Figura 4-56.</b> Curva Fuerza vs Frames a T=20°C .....	132
<b>Figura 4-57.</b> Curva Fuerza vs Frames a T=60°C .....	132
<b>Figura 4-58.</b> Colores escalados tipo "jet" de Matlab.....	133
<b>Figura 4-59.</b> Gráfica de correlación del canal rojo para deformación a 20°C y 60°C en video #9.....	139
<b>Figura 4-60.</b> Valores de fuerza de la posiciones seleccionadas a T=20°C .....	141
<b>Figura 4-61.</b> Valores de fuerza de la posiciones seleccionadas a T=60°C .....	141

## Lista de tablas

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1.</b> Ventajas y desventajas del polariscopio plano y circular .....	37
<b>Tabla 2.</b> Imágenes de fotoelasticidad representativas de la deformación a T=20°C y 60°C .....	78
<b>Tabla 3.</b> Comparativo de área bajo la curva.....	84
<b>Tabla 4.</b> Resultados del error por evaluación de la ANFIS entrenada .....	102
<b>Tabla 5.</b> Resultado de Correlación de imagen real vs imágenes sintético-real.....	104
<b>Tabla 6.</b> Imágenes reales de deformación a T=20°C vs Imágenes sintético-reales .....	106
<b>Tabla 7.</b> Imágenes reales de deformación a T=20°C, Imagen de retardo (blanco: 0nm, negro: 3000nm).....	108
<b>Tabla 8.</b> Imágenes de paradas.....	113
<b>Tabla 9.</b> Punto de medición “P” y espesor medido “t” [micras] del primer video .....	114
<b>Tabla 10.</b> Selección de parámetros ANFIS .....	115
<b>Tabla 11.</b> Imágenes reales de deformación a T=20°C, Imagen de espesor (negro: 138µm, blanco:75µm) .....	118
<b>Tabla 12.</b> Imágenes reales de deformación a T=60°C, Imagen de espesor (negro: 138µm, blanco:75µm).....	120
<b>Tabla 13.</b> Imágenes de cuantificación de los cambios de intensidad a T=20°C y T=60°C .....	124
<b>Tabla 14.</b> Área de segmentación de cuantificación de intensidad T=20°C y T=60°C ....	125
<b>Tabla 15.</b> Imágenes reales de deformación a T=20°C e Imagen de esfuerzo .....	133
<b>Tabla 16.</b> Imágenes reales de deformación a T=60°C e Imagen de esfuerzo .....	136
<b>Tabla 17.</b> Imágenes reales de frames seleccionados cruce por cero T=20°C y T=60°C .....	140

---

<b>Tabla 18.</b> Imágenes real frame 34, T=20°C, imagen de retardo, espesor y esfuerzo ....	142
<b>Tabla 19.</b> Imágenes real frame 34, T=60°C, imagen de retardo, espesor y esfuerzo ....	142
<b>Tabla 20.</b> Imágenes real frame 51, T=20°C, imagen de retardo, espesor y esfuerzo ....	143
<b>Tabla 21.</b> Imágenes real frame 51, T=60°C, imagen de retardo, espesor y esfuerzo ....	143
<b>Tabla 22.</b> Imágenes real frame 83, T=20°C, imagen de retardo, espesor y esfuerzo ....	144
<b>Tabla 23.</b> Imágenes real frame 83, T=60°C, imagen de retardo, espesor y esfuerzo ....	144
<b>Tabla 24.</b> Imágenes real frame 120, T=20°C, imagen de retardo, espesor y esfuerzo ..	145
<b>Tabla 25.</b> Imágenes real frame 120, T=60°C, imagen de retardo, espesor y esfuerzo ..	145
<b>Tabla 26.</b> Imágenes real frame 156, T=20°C, imagen de retardo, espesor y esfuerzo ..	146
<b>Tabla 27.</b> Imágenes real frame 156, T=60°C, imagen de retardo, espesor y esfuerzo ..	146
<b>Tabla 28.</b> Imágenes real frame 210, T=20°C, imagen de retardo, espesor y esfuerzo ..	147
<b>Tabla 29.</b> Imágenes real frame 210, T=60°C, imagen de retardo, espesor y esfuerzo ..	147
<b>Tabla 30.</b> Imágenes real frame 413, T=20°C, imagen de retardo, espesor y esfuerzo ..	148
<b>Tabla 31.</b> Imágenes real frame 413, T=60°C, imagen de retardo, espesor y esfuerzo ..	148
<b>Tabla 32.</b> Imágenes real frame 600, T=20°C, imagen de retardo, espesor y esfuerzo ..	149
<b>Tabla 33.</b> Imágenes real frame 600, T=60°C, imagen de retardo, espesor y esfuerzo ..	149
<b>Tabla 34.</b> Imágenes real frame 750, T=20°C, imagen de retardo, espesor y esfuerzo ..	150
<b>Tabla 35.</b> Imágenes real frame 750, T=60°C, imagen de retardo, espesor y esfuerzo ..	150
<b>Tabla 36.</b> Máximo y mínimo esfuerzo de frames seleccionados. ....	152



# 1. Introducción

## 1.1 Antecedentes y justificación

La industria de alimentos de carnes frías emplea empaques plásticos para brindar una barrera hermética y preservación del producto alimenticio. Para la creación del empaque se utiliza una película plástica multicapa, la cual es termoformada en la cavidad requerida para el empaque del producto. Una reconocida empresa local produce 5.000.000 de unidades de paquetes al mes, donde al 10% de la producción se le realiza una inspección de calidad destructiva al empaque. Esto representa pérdidas no solo en materia prima sino también en tiempo de procesamiento. Para el 90% no inspeccionado es incierta su calidad.

Durante el proceso de termoformado, la película plástica multicapa sufre cambios en la capa de barrera que evita el intercambio de gases. Este fenómeno es debido a la reducción del espesor, el cual se debe al estiramiento y la concentración de esfuerzos en el área de mayor deformación.

La caracterización de la película plástica multicapa en el proceso de termodeformación ayudaría a la industria de alimentos a tomar medidas correctivas dentro de sus procesos como la modificación de la temperatura de moldeo y/o velocidad de la deformación. Por esta razón es necesario considerar la estimación del espesor en el área de mayor concentración de esfuerzos. Para ello se requieren técnicas de medición de no contacto sobre la línea de producción, que tenga alta velocidad de procesamiento y que permita inspeccionar tanto la materia prima como todos los empaques producidos.

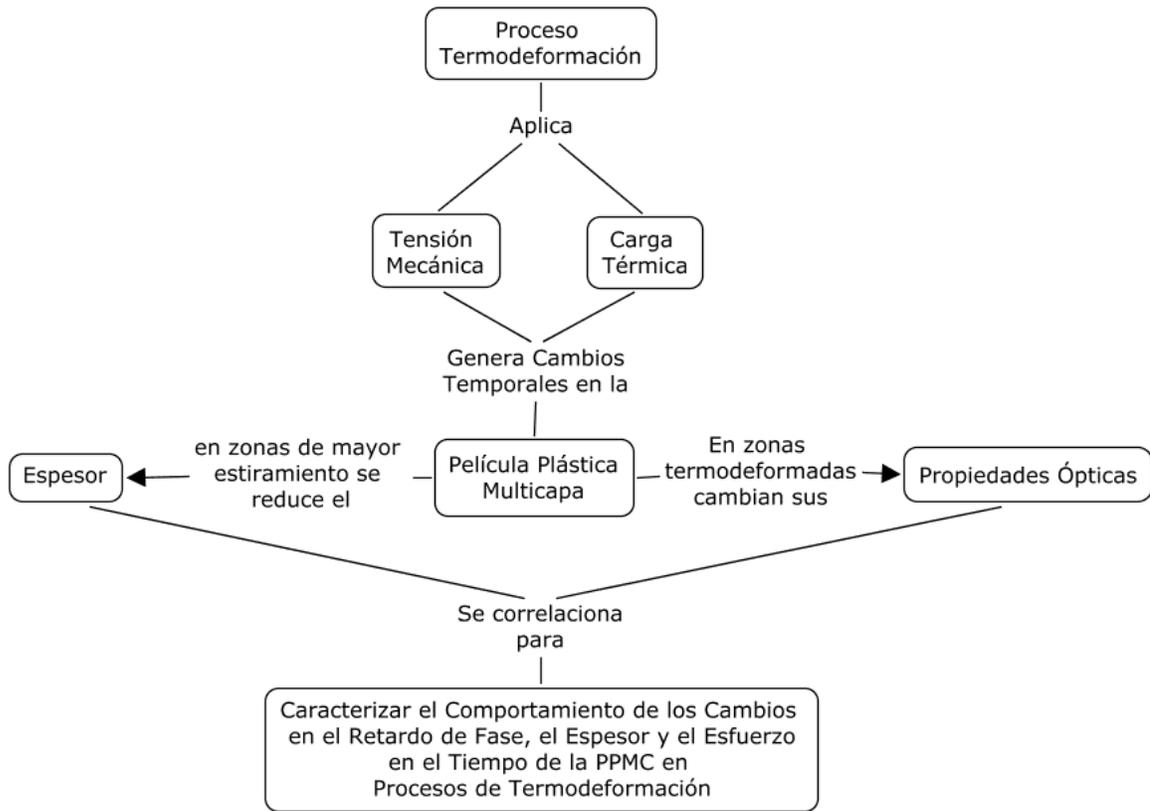
El ITM, a través de su Grupo de Investigación de Automática, Electrónica y Ciencias Computacionales, en la línea de Visión Artificial y Fotónica han adelantado y producido resultados importantes en la caracterización de los cambios presentados en películas plástica multicapa en procesos de deformación mecánica. Dentro de estos se destaca el trabajo de grado para el título de maestría de Briñez de León (2013), donde se realizó el estudio de patrones de interferencia de color producidos por la técnica de la fotoelasticidad, la cual revela los esfuerzos mecánicos a través de franjas de color debido a la polarización de la luz que los atraviesa.

Las correlaciones mostradas por Briñez de León (2013), se representaron en deformación mecánica sin la componente térmica. En este proyecto de investigación se adicionará carga térmica, para representar una aproximación al proceso de termoformado y complementándolo con análisis de retardo de fase, de espesor y esfuerzo para deformación a 20°C y 60°C.

## **1.2 Planteamiento y delimitación del problema**

Para el planteamiento del problema, se deben abordar inicialmente los conceptos enmarcados en el proceso: la carga térmica y la tensión mecánica. Estos elementos son factores de cambio en la película plástica multicapa (PPMC). En la Figura 1-1 se muestran los dos focos teóricos en los cuales estará orientado el proceso de investigación los cuales son: la disminución del espesor y los cambios en las propiedades ópticas de la PPMC. Estas dos componentes están relacionadas, ya que al haber variación del espesor por deformación termomecánica, también hay variación del índice de refracción.

**Figura 1-1.** Focos teóricos del planteamiento del problema



*Fuente: Elaboración propia.*

La revisión bibliográfica (Ramesh & Mangal en 1998, Ramesh & Ramakrishnan en el 2011, Ajovalasit, Petrucci, & Scafidi en el 2015) muestran que los análisis de fotoelasticidad en general se han desarrollado con muestras de material homogéneo y espesor definido e invariante, adicionalmente la proporción de trabajos dinámicos (Lim & Ravi-Chandar en el 2007, Li, Yang, Ni, & Zhu en el 2011, Briñez, Restrepo, & Branch en el 2016) son menores que los análisis con carga estática, lo cual en consecuencia abordar un material multicapa, con cambios de espesor y sometido a variaciones de carga es una oportunidad de exploración.

Teniendo en cuenta la necesidad de la industria y el alcance abierto de los artículos actuales (Agudelo, 2009), se evidencia la escasez de investigaciones que se enfoquen en caracterizar el comportamiento de las películas plásticas multicapa, adicionando a la tensión mecánica una carga térmica que se aproxime a las condiciones reales dadas en el proceso industrial.

Para llevar a cabo la caracterización, la técnica de la fotoelasticidad digital se enfrenta a situaciones tales como: áreas de muy bajo espesor en donde los colores de interferencia son de alto orden y tienden a ser poco perceptibles dificultando la extracción de características del espacio de color. Las franjas de color con bordes difusos dificultan la determinación de su posición, tiempo de permanencia y cantidad de franjas que muestran un comportamiento temporal en la colección de imágenes adquiridas. Los cambios del espesor y los índices de refracción modifican el retardo de fase que se genera al rayo de luz que atraviesa el material birrefringente, revelando los cambios asociados por la disminución del espesor en términos de la intensidad en espacios de color. El brillo y la saturación que muestran cambios de orden de las franjas afectan la capacidad de transmisión y reflexión de luz en el montaje, todo esto enmarcado en cambios temporales.

Las preguntas abiertas que se encontraron incluyen: ¿Cómo se afecta la capacidad discriminante de la fotoelasticidad cuando se adiciona una carga térmica en el proceso de deformación?, ¿Cómo la componente térmica cercana al punto de fusión de la película reduce el esfuerzo en las zonas de menor espesor? ¿En términos de la variación del espesor, cómo se comportan los colores de interferencia? ¿Cómo describir la fotoelasticidad cuando tanto el espesor como el índice de birrefringencia cambian?

En síntesis, el problema es que al tener una colección de imágenes adquiridas por la técnica de la fotoelasticidad digital se presenta dificultad para determinar las características descriptivas de las franjas de color, los cambios de orden y los bordes difusos que están relacionadas con la variación del espesor, el índice de refracción y los esfuerzos presentados en la película plástica multicapa debidos a la deformación viscoelástica durante el proceso de termodeformación. Esto nos conlleva a la pregunta que se pretende resolver en este proyecto de investigación:

¿Cómo determinar los comportamientos de los cambios presentados en las películas plásticas multicapa a través de imágenes digitales adquiridas por fotoelasticidad y como establecer con ellas la correlación entre las propiedades mecánicas, fenómenos ópticos y la variación del espesor, cuando las películas se someten a una termodeformación con cambios temporales?

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Objetivo general

Proponer una metodología para la caracterización de los cambios en las películas plásticas multicapa en procesos de termodeformación usando fotoelasticidad digital y estimación de espesor.

### 1.3.2 Objetivos específicos

- Caracterizar el montaje para la adquisición de imágenes en fotoelasticidad, calibración de color y proceso de termodeformación.
- Correlacionar el espacio de color con el espesor y fotoelasticidad.
- Caracterizar zonas de esfuerzos determinadas por franjas de color en el mapa de esfuerzos.
- Evaluar la caracterización de las películas plásticas multicapa en procesos de termodeformación a través de la variación del espesor y fotoelasticidad.

## 1.4 Hipótesis

Para contestar la pregunta de investigación se debe iniciar por identificar y describir el comportamiento de los cambios de las franjas de color mostradas en las imágenes digitales adquiridas por la técnica de fotoelasticidad digital y la correlación entre los colores de interferencia, la variación del espesor y la intensidad del espectro en la película plástica multicapa cuando está siendo sometida a deformación viscoelástica con carga termomecánica. Una de las variables claves para dimensionar el comportamiento de la película plástica multicapa es el espesor y por lo tanto se utilizará una técnica de algoritmos inteligentes para la estimación del espesor, la cual demostrará que existe una correlación entre las variaciones del espesor con los cambios de orden en las franjas de color y los esfuerzos mecánicos asociados por la termodeformación.



## **2. Marco Teórico y Estado del Arte**

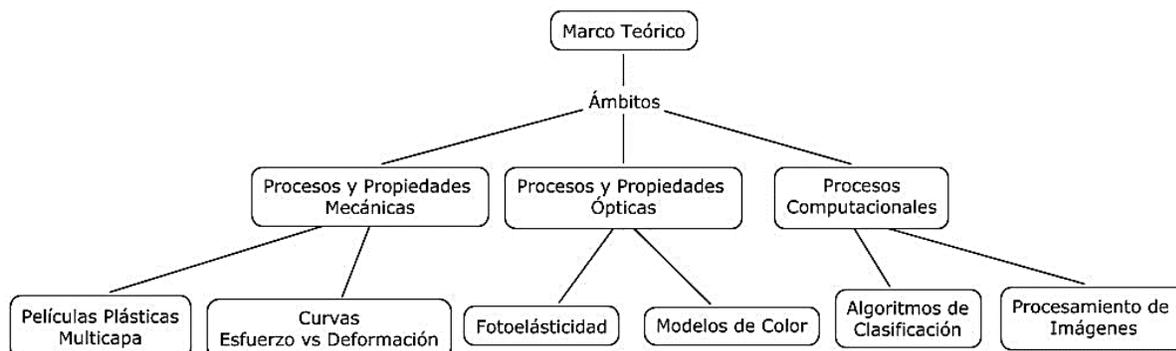
### **2.1 Introducción**

La caracterización de los cambios en las películas plásticas multicapa en procesos de termodeformación usando fotoelasticidad digital está enfocada en el análisis de las imágenes adquiridas durante el proceso de deformación, el cual presentan franjas de color que están directamente relacionadas con los cambios en las propiedades mecánicas y ópticas del material. Con el fin de llevar a cabo el desarrollo del trabajo de investigación es necesario realizar un acotamiento del marco teórico y una revisión bibliográfica.

Este capítulo se presenta en dos secciones. En la primera se presenta un marco teórico que enmarca las propiedades mecánicas y ópticas de las películas plásticas multicapa al igual que la conceptualización de los procesos y técnicas de análisis que se emplearan en la investigación. En la segunda sección se muestra el estado del arte donde se plantea la revisión bibliográfica pertinente sobre técnicas relacionadas con fotoelasticidad, reconocimiento de patrones y correlación digital de imágenes.

### **2.2 Marco teórico**

Los conceptos básicos para abordar este documento de investigación se pueden apreciar en el mapa conceptual mostrado en la Figura 2-1, en el cual se tiene tres planos conceptuales tales como los procesos y propiedades mecánicas a las que se expone la película plástica. En el segundo plano tenemos los procesos y propiedades ópticas que se modifican y/o se manifiestan durante los procesos mecánicos. El en tercer plano se tienen los procesos computacionales que revelan información de sus características para el análisis de las colecciones de imágenes adquiridas.

**Figura 2-1.** Mapa conceptual del marco teórico

Fuente: *Elaboración propia.*

### 2.2.1 Procesos y propiedades mecánicas de las películas plásticas multicapa

En la industria de alimentos se emplean películas plásticas multicapa (siglas PPMC) para el empaqueo de productos. Estas películas plásticas flexibles necesitan cumplir una serie de requerimientos técnicos, como por ejemplo una alta o mediana barrera de oxígeno, que promueve una larga vida útil del producto y evita la contaminación de los alimentos almacenados en el empaque y su consecuente riesgo potencial para la salud humana (Crippa, Sydenstricker, & Amico, 2008).

- **Proceso de fabricación:**

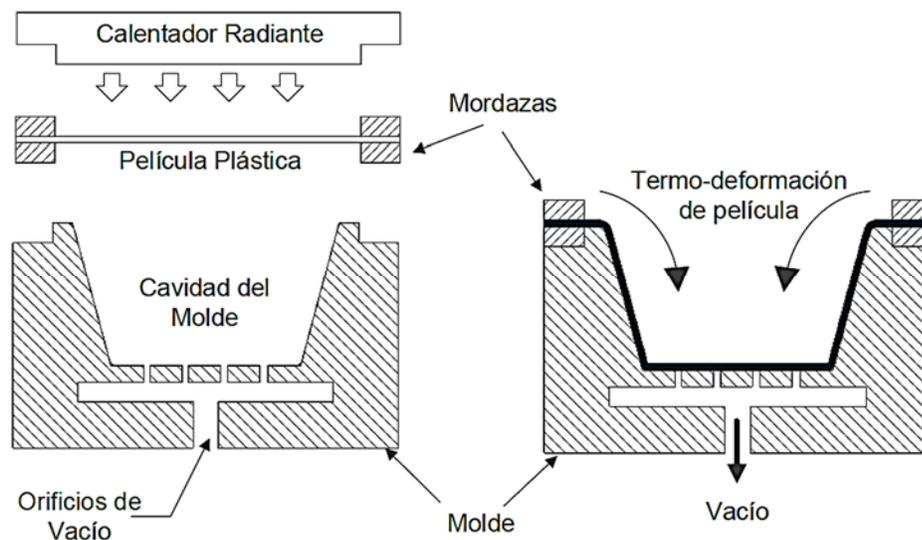
El proceso de fabricación de las películas plásticas multicapa es llamado co-extrusión o laminado, donde dos o más polímeros son extruidos y unidos de manera simultánea formando una sola película. Estas son diseñadas con diferentes tipos de polímeros y número de capas según las necesidades de barrera propias del producto a almacenar y a su proceso de empaqueo. Dentro de los tipos de polímeros empleados para las diferentes capas se tienen el Nylon, EVOH (Etileno vinil-alcohol), PP (Polipropileno), LDPE (Polietileno de baja densidad), PA (Poliámida), EVA (Etileno vinil acetato) y TL (*Tie Layer* adhesivo que pueden ser poliéster, copolímeros de etileno, poliuretanos o acrílicos) con espesores de la película multicapa desde 25 a 250 micras y los procesos en que son empleados se contemplan empaqueo al vacío, termoformado, llenado en caliente, llenado de líquidos en frío/congelado y llenado de gases (Agudelo, 2009).

En este proyecto de investigación la película empleada para los experimentos y análisis está compuesta por cinco capas (LDPE/NYLON/EVOH/NYLON/LDPE), de alta barrera al oxígeno, espesor de 130 $\mu$ m, transparente y con propiedades de termoformado para empacado al vacío.

▪ **Proceso de termoformado:**

El proceso de termoformado típico inicia cuando una película plástica se calienta ligeramente por debajo de la temperatura del punto de fusión (105°C para la PPMC de la investigación). El calentamiento se consigue usando calentadores radiantes hasta que la película plástica alcanza la temperatura de formado, y una vez que esta ha sido calentada es forzada contra la cavidad del molde ya sea mecánica o neumáticamente. Una de las maneras es generando un vacío en la cavidad del molde en el cual la película plástica se estira hasta tocar la superficie del molde (ver Figura 2-2). El principal problema con este proceso de formado es la distribución irregular del espesor (Ashter, 2013);

**Figura 2-2.** Esquema del proceso de termoformado por vacío

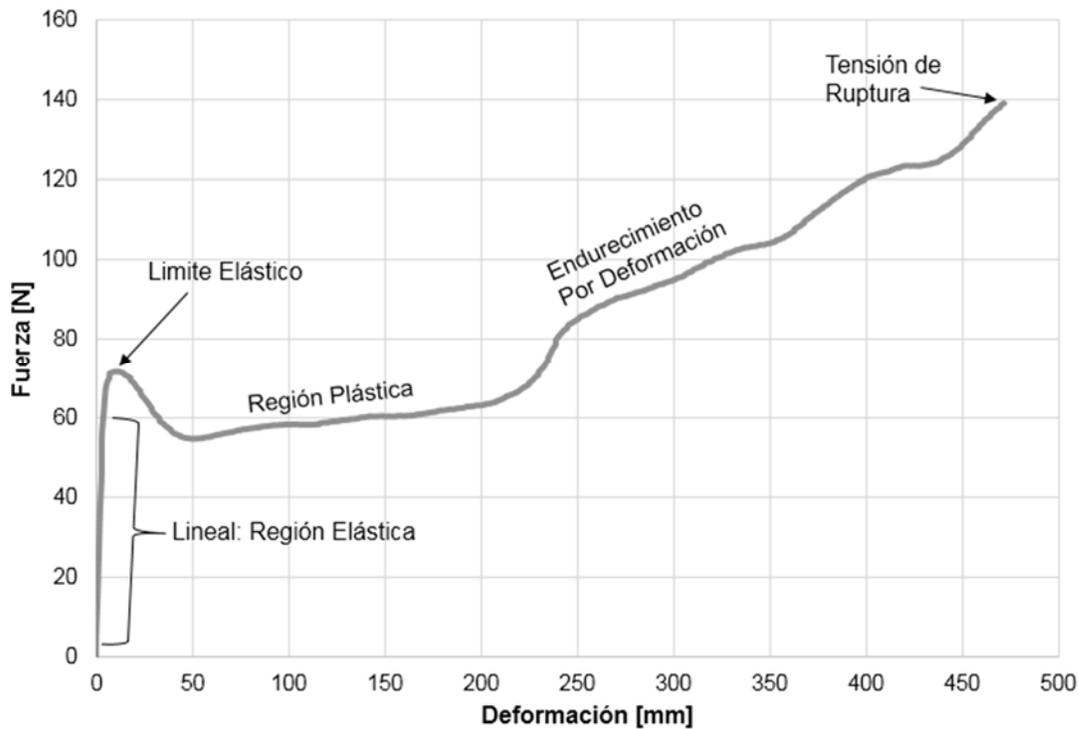


Fuente: Tomada y redibujada de <http://www.sinotech.com/images/thermoformed4.gif>

- **Propiedades mecánicas:**

Dentro de las propiedades mecánicas de las PPMC pueden mencionar las propiedades a tensión que indican cómo se comporta la película plástica ante una fuerza de tensión. Este comportamiento se plasma en una curva de fuerza vs deformación (ver Figura 2-3) en la cual se puede determinar el módulo de elasticidad, límite elástico, resistencia a la tracción, tensión de ruptura, porcentaje de alargamiento a la ruptura y resistencia a la fluencia. Las características mencionadas son ampliadas en la norma ASTM D882 (2002) que corresponde al método de prueba estándar para propiedades de tensión de películas delgadas de plástico.

**Figura 2-3.** Curva típica de Fuerza vs Deformación de Película Plástica



Fuente: Elaboración propia.

### 2.2.2 Procesos y propiedades ópticas de las películas plásticas multicapa

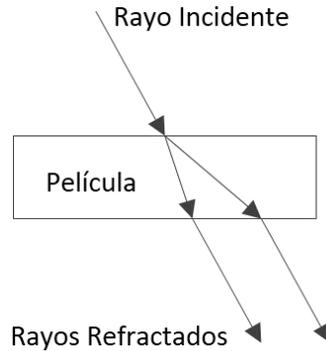
Los polímeros se consideran sólidos amorfos, viscoelásticos e isotrópicos con un módulo de Poisson de 0.5 y su índice de refracción disminuye ligeramente cuando aumenta el peso molecular (Seymour & Carraher, 2002).

La PPMC empleada en este trabajo tiene características de translucidez (permite la transmisión de la luz) ya que los materiales empleados en la co-extrusión son polímeros amorfos con diferentes índices de refracción y cada capa es transparente debido a la disposición casual de las cadenas poliméricas y estas no interrumpen la luz de forma uniforme. Por el contrario, los polímeros semicristalinos presentan regiones cristalinas muy ordenadas que desvían la luz considerablemente. El resultado es que los materiales semicristalinos suelen ser traslúcidos u opacos.

Luego de mostrar las propiedades y el proceso de termodeformación a la que son sometidas las películas plásticas multicapa se debe mencionar que estas presentan durante la deformación variaciones en sus propiedades ópticas como son la claridad (fracción de iluminación transmitida (Raimond, Seymour, & Carraher, 1995)) y el índice de refracción.

- **Birrefringencia:**

Los materiales plásticos traslúcidos son ópticamente isotrópicos cuando están libres de esfuerzo mecánico pero al ser sometidos a carga mecánica (compresión o tensión) se transforman en materiales anisotrópicos, los cuales presentan doble refracción temporalmente (W. Wang, 1990). La doble refracción es conocida como birrefringencia y es proporcional al esfuerzo. En la Figura 2-4 se puede apreciar que el rayo de luz incide sobre la PPMC se descompone en dos rayos en direcciones distintas y uno de estos es llamado rayo ordinario y el otro en rayo extraordinario y poseen índices de refracción diferentes, por lo tanto el tiempo que tarda cada rayo de luz durante la transmisión sobre la película plástica son diferente y emergen desfasadas explicando así el fenómeno fotoelástico. Si la luz incidente fuese polarizada y a su salida se analizará con un filtro polarizador se generarían colores de interferencia.

**Figura 2-4.** Birrefringencia

Fuente: *Elaboración propia*

- **Fotoelasticidad digital:**

La fotoelasticidad digital es una técnica experimental de campo completo que consiste la adquisición de imágenes a color del fenómeno fotoelástico generado por el montaje óptico de polarización (polariscopio); estas imágenes adquiridas muestran franjas de color que proveen la información de la diferencia de los esfuerzos principales (franjas isocromáticas) y la dirección de los esfuerzos principales (franjas isoclínicas). (Ashokan & Ramesh, 2009).

En el análisis de películas delgadas en donde el espesor es pequeño en relación con las dimensiones en el plano y sí la tensión actúa en paralelo al plano del modelo de tal manera es posible hallar el esfuerzo en un sistema de coordenadas cartesianas y expresadas de la forma:

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (2-1)$$

Navarro, Martínez, Saavedra, & Pons (2013) definen  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  como las magnitudes de los esfuerzos principales en el punto bajo consideración. Cuando un haz de luz polarizada linealmente se propaga a través del material tensionado con espesor  $t$ , la onda de luz es dividida en dos componentes ortogonales viajando a diferentes velocidades (Figura 2-5 y 2-6), cada una polarizada linealmente y orientada en paralelo a una de las direcciones de los esfuerzos principales  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$ . La diferencia del camino óptico (retardo de fase) de los dos rayos es dado por:

$$\delta = qt(n_1 - n_2) \quad (2-2)$$

En la ecuación 2-2,  $n_1$  y  $n_2$  son los índices de refracción experimentados por cada componente a lo largo de las direcciones  $s_1$ ,  $s_2$  y  $q$  es el número de veces que la luz pasa a través del material.

La ley del esfuerzo óptico establece la correlación entre el cambio del índice de refracción como una función proporcional a la diferencia entre los esfuerzos principales sobre el espécimen en un punto seleccionado y esta relación fue formulada por Brewster en 1816 y puede ser escrita como:

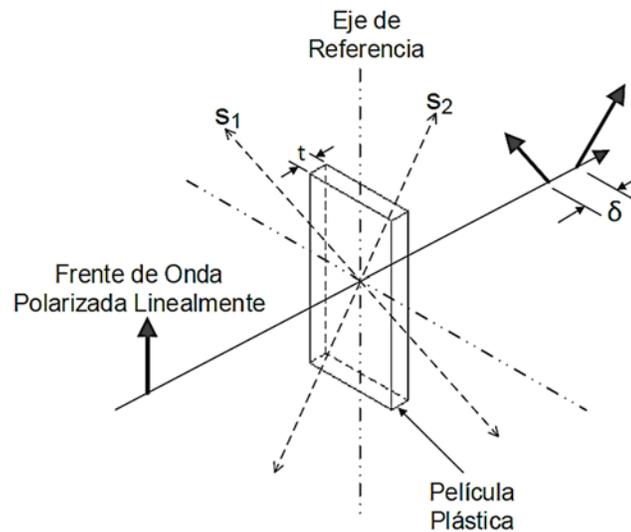
$$(n_1 - n_2) = C(\sigma_1 - \sigma_2) \tag{2-3}$$

Donde C es llamado coeficiente de esfuerzo óptico y define una propiedad física del material que tiene dimensiones recíprocas al esfuerzo [ $m^2/N$ ] pero en estudios recientes este coeficiente es dependiente de la longitud de onda de la fuente de iluminación (Ramesh, 2000). Los autores Muller & Vergnes en 1996 presentan algunos valores típicos de C, PVC (0.2 a 0.5), HDPE (1.5 a 2.4), LPDE (2.0 a 3.0), PP (0.6 a 0.9) y vidrio (2.4 a 3.6); combinando las ecuaciones 2-2 y 2-3 obtenemos:

$$(\sigma_1 - \sigma_2) = \frac{\delta}{qtC} \tag{2-4}$$

Basado en la ecuación 2-4, es posible obtener la diferencia del esfuerzo en cualquier punto de la muestra desde la medición del retardo relativo sí se conoce el coeficiente de esfuerzo óptico C del material bajo estudio (Navarro et al., 2013).

**Figura 2-5.** Luz polarizada linealmente pasando a través de un material a tensión



Fuente: Tomada y redibujada de (Navarro et al., 2013).

El polariscopio es un instrumento básico usado en experimentos de fotoelasticidad que permite el análisis de la distribución de esfuerzos en materiales transparentes en donde se evidencia el retardo relativo de la luz, estos generalmente son empleados en uno de dos configuraciones: el polariscopio plano y el polariscopio circular. Adicionalmente, pueden trabajar en modo reflexión o por transmisión.

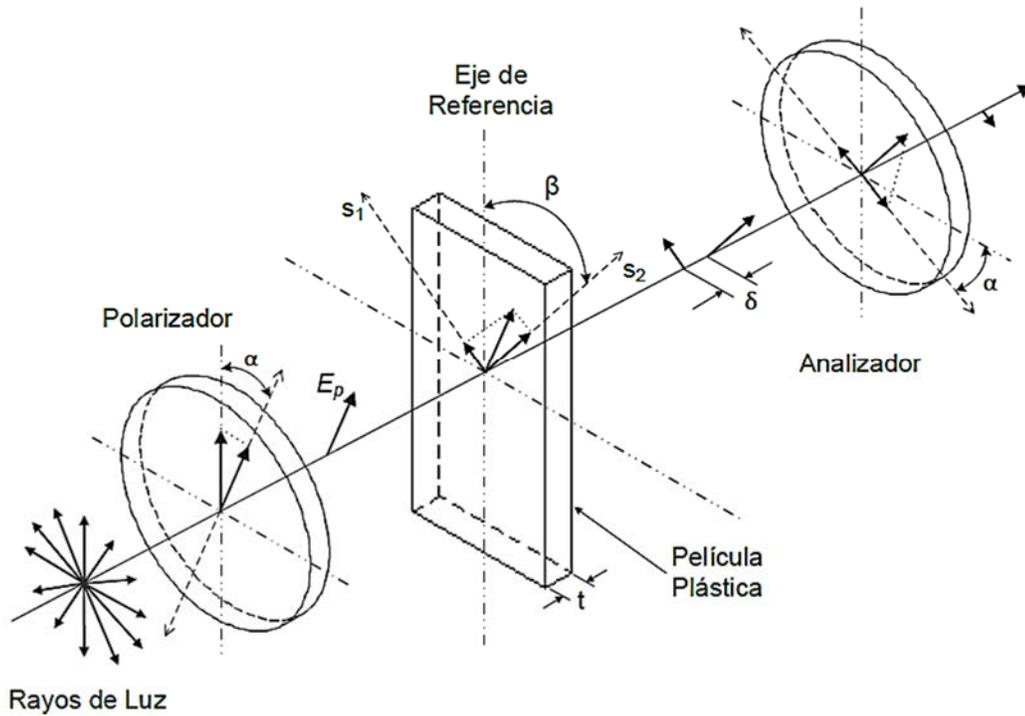
- **Polariscopio plano:**

El montaje de polariscopio plano consta de una fuente de iluminación que irradia a dos polarizadores lineales dispuestos en su línea de transmisión. En medio de los polarizadores se encuentra el modelo en evaluación. Es de resaltar que dentro de las configuraciones del polariscopio, a menudo se utiliza una configuración cruzada. Esta configuración corresponde a posiciones en las que los ejes de transmisión de los instrumentos polarizadores se ubican perpendiculares entre sí, como se observa en la Figura 2-6. En este caso, la luz incoherente de la fuente de iluminación pasa a través del primer polarizador, y emerge oscilando en un mismo plano (polarizada en el eje de transmisión del polarizador). Cuando el rayo de luz polarizada viaja a través del modelo en estudio (birrefringente), se generan dos rayos ortogonales con un desfase  $\delta$  entre ellos, y proporcional a los esfuerzos en el punto de evaluación. Finalmente estos rayos son alineados nuevamente por el segundo polarizador, el cual muestra la magnitud del retardo en términos de variaciones de intensidad. De este modo, la intensidad resultante de luz es una función del retardo  $\delta$  y el ángulo entre el analizador y los esfuerzos principales ( $\beta - \alpha$ ). La intensidad de la luz emergente del polariscopio plano es (Navarro et al., 2013):

$$I = E_p^2 \text{sen}^2 2(\beta - \alpha) \text{sen}^2 \left( \frac{\pi \delta}{\lambda} \right) \quad (2-5)$$

Donde  $E_p$  es la amplitud de la componente del campo eléctrico transmitido por el primer polarizador y  $\lambda$  es la longitud de onda emitida por la fuente de luz.

**Figura 2-6.** Polariscopio Plano



Fuente: Tomada y redibujada de (Navarro et al., 2013).

▪ **Polariscopio circular:**

El polariscopio circular además de usar dos polarizadores lineales, también utiliza dos placas de cuarto de onda  $\lambda/4$ , las cuales se ubican generalmente cruzadas entre sí, y a  $45^\circ$  del eje de transmisión del polarizador, como se puede apreciar en la Figura 2-7. Para este caso la intensidad de luz emergente del polariscopio está dada por (Navarro et al., 2013):

$$I = E_p^2 \text{sen}^2 \left( \frac{\pi \delta}{\lambda} \right) \tag{2-6}$$

La intensidad es cero cuando se da la siguiente condición:

$$\delta = N\lambda, \forall N \in \mathbb{N} \tag{2-7}$$

Un patrón de bandas claras y oscuras se forman en la salida del polariscopio circular, el orden de la franja es definida como el valor de N. Combinando (2-4) y (2-7) la diferencia de los esfuerzos principales puede ser obtenida por:

$$(\sigma_1 - \sigma_2) = \frac{N\lambda}{qtC} \tag{2-8}$$

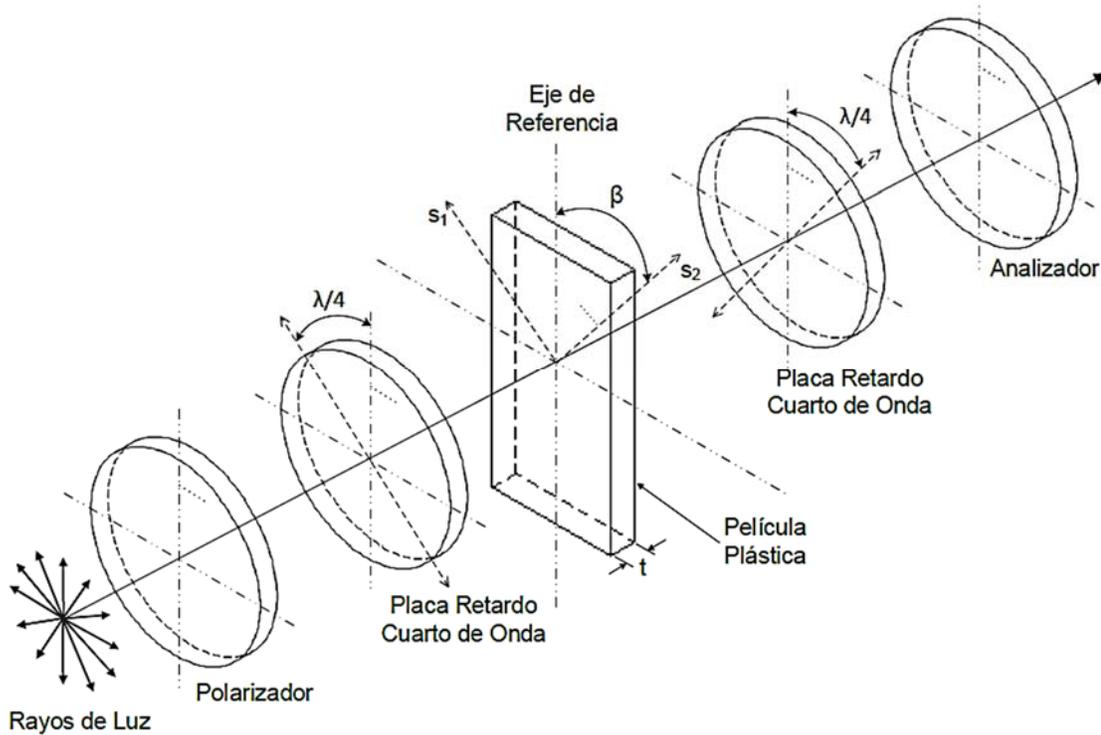
Comparando (2-5) y (2-6) se puede ver que tanto en el polariscopio plano como en el circular se producen patrones de franjas pero la intensidad en el polariscopio plano tiene una relación de proporción por el término  $\sin^2 2(\beta - \alpha)$  en donde la máxima intensidad se puede dar al obtener una diferencia de  $\pi/4$  entre ángulo del polarizador respecto al eje del esfuerzo principal (Navarro et al., 2013).

En cada punto en donde el campo eléctrico de la luz incidente polarizada linealmente es paralela a cualquiera de los ejes locales de los esfuerzos principales, la onda pasará a través de la muestra sin ser afectada, independientemente de la longitud de onda. Con polarizadores configurados de manera cruzada (ejes de transmisión ubicados perpendicularmente entre sí) la luz es absorbida por el analizador produciendo así una región oscura conocida como banda isoclínica. Dentro de los trabajos enfocados a la evaluación tanto del campo de esfuerzos como de los ángulos de los esfuerzos principales, las técnicas basadas en corrimiento de fase suelen ser las más utilizadas. Sin embargo no serán abordadas en este trabajo puesto que requieren de la adquisición de múltiples imágenes y de un complejo sub-procesamiento.

En un modelo birrefringente, el retardo de fase varía con la longitud de onda utilizada en la fuente de iluminación. Para el caso, y en particular el nuestro, donde la fuente es de luz blanca, las variaciones de intensidad a la salida del polariscopio se observan como patrones de franjas de color. En relación a ello podría decirse que la respuesta del fenómeno óptico frente a luz blanca obedece a la superposición de las respuestas por cada uno de los valores que integran el espectro visible. Aquí, colores con una misma intensidad indican mismos valores de esfuerzos (Mapa isocromático).

Dentro de las diferencias que resaltan al comparar los dos tipos de polarizadores mencionados, es que el polariscopio plano siempre muestra la superposición del mapa isocromático con el mapa isoclínico, limitando en muchos casos su separación. No obstante el polariscopio circular permite configuraciones donde se logra eliminar el efecto del mapa isoclínico. Para efectos prácticos, las mediciones cualitativas se basan en el análisis de las franjas isocromáticas libres de isoclínicos, para ellos una configuración cruzada permite la obtención de los patrones tal cual se requieren. En Tabla 1 se exponen las ventajas y desventajas del polariscopio plano y circular donde se evalúa dificultad en el montaje e información que suministra.

**Figura 2-7.** Polariscopio circular



Fuente: Tomada y redibujada de (Navarro et al., 2013)..

**Tabla 1.** Ventajas y desventajas del polariscopio plano y circular

Modelo de Polariscopio	Ventajas	Desventajas
Plano	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Montaje simplificado.</li> <li>• Menor uso de elementos ópticos.</li> <li>• Poco susceptibles a la calibración.</li> <li>• Modelo matemático simplificado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Combinación del patrón isoclínico con el patrón isocromático.</li> <li>• Dificultad para el cálculo del retardo de fase y el conteo manual de las franjas</li> </ul>
Circular	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Separación del patrón isoclínico con el patrón isocromático.</li> <li>• Múltiple configuración para el conteo de las franjas.</li> <li>• Sistemas de expresiones para la intensidad de la luz, una por cada configuración.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uso de un mayor número de componentes ópticos en el montaje.</li> <li>• Mayor susceptibilidad a la calibración de los elementos ópticos.</li> <li>• Conteo manual de las franjas.</li> </ul>

Fuente: Tomada de (Briñez, Restrepo, & Lopez, 2003)

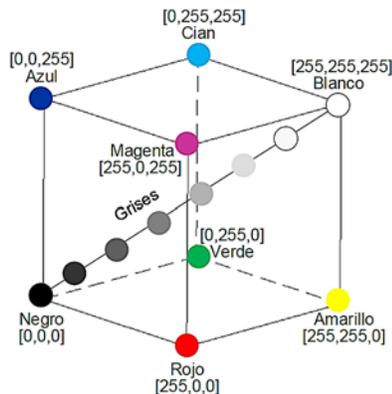
- **Modelos de color:**

Los modelos de color son representaciones del color a través de modelos matemáticos abstractos que describen cuantitativamente la intensidad del color, empleando tres o cuatro componentes cromáticos. El objetivo de un modelo de color es facilitar la especificación de los colores de una forma normalizada y aceptada genéricamente. Además están especificados por sistemas de coordenadas tridimensionales y un subespacio de este sistema donde cada color está representado por un solo punto (Iniewski, 2013).

Existen varios modelos o espacios de color como por ejemplo el **RGB** que está basado en la intensidad de colores primarios aditivos **Red** (rojo), **Green** (verde) y **Blue** (azul), y son representados por un sistema de coordenadas cartesiano tridimensional (ver Figura 2-8). La línea diagonal que muestra en la figura entre el blanco y el negro se tiene la escala de grises, este espacio de color es el más utilizado y entregado por los dispositivos de adquisición de imágenes.

Para una imagen 2D de color verdadero cada pixel tiene tres componentes (R, G y B) y cada una de estas tiene una profundidad de 8 bits (también son posibles profundidades de 12, 16, 24 y 32 bits) con la cual se puede obtener un poco más de 16.7 millones de colores posibles y cada componente de estas tiene un rango de 0 a 255, en donde el cero "0" representa el color negro y el 255 el blanco.

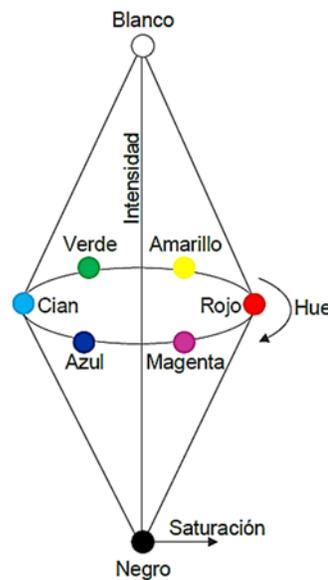
**Figura 2-8.** Modelo de color RGB



*Fuente: Elaboración propia.*

En el modelo de color **HSI**, su nombre corresponde a una sigla, cuyas componentes son: **Hue** (matiz ó tonalidad ), **Saturation** (saturación) y **Intensity** (intensidad). La componente de intensidad “I” está desacoplada de la información cromática contenida en la imagen y las componentes de tono y saturación están relacionadas con la forma en que los seres humanos perciben el color. En la Figura 2-9 se puede apreciar que el color está representado con un espacio de doble cono, donde el eje vertical es la intensidad y representa la variación en la claridad y la oscuridad de un color. El nivel de 0 intensidad es el negro y la máxima intensidad 255 es blanco y a lo largo de este eje se representan niveles de gris. Un corte horizontal a través del espacio del modelo, el matiz “Hue” (ó “color” del color) varía alrededor del corte, y la saturación (pureza del color) aumenta radialmente hacia afuera desde el eje central de la intensidad, la intensidad no contribuye al color. (Y. Wang et al., 2010)

**Figura 2-9.** Modelo de color HSI

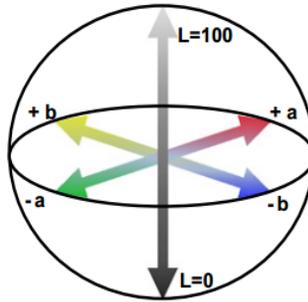


*Fuente: Elaboración propia.*

Otro modelo de color es el **CIELAB**, el cual fue desarrollado por la Comisión Internacional de la Iluminación (*Commission Internationale d'Eclairage*) y se definió para la estimación de la calidad del color, y es usado normalmente para describir todos los colores que puede percibir el ojo humano. Los tres parámetros “Lab” en el modelo se representan así: **L** indica la claridad, **a** y **b** son los componentes de color (ver Figura 2-10). El valor de claridad en  $L=0$  representa lo más oscuro (negro) y  $L=100$  representa el blanco más brillante; los componentes **a** y **b** representa los valores de gris en  $a=0$  y  $b=0$ . El valor negativo de **a**

representa el color verde y el valor positivo el rojo / magenta, del mismo modo el negativo de **b** representa el azul y positivo el color amarillo (Kaur & Gmt, 2015).

**Figura 2-10.** Modelo de color CIELab



*Fuente: Tomada de Korifi, Le Dréau, Antinelli, Valls, & Dupuy, (2012).*

### 2.2.3 Procesos computacionales

En el desarrollo del proyecto las imágenes de fotoelasticidad adquiridas durante el proceso de termodeformación serán analizadas con el fin de determinar las características discriminantes que se pueden extraer de los colores de interferencia (frangas de color), y obtener con técnicas de reconocimiento de patrones la identificación o clasificación de las diferentes regiones de esfuerzos que están directamente involucradas con el espesor. Por lo tanto es necesario adentrar en conceptos como extracción de características basadas en filtros de Gabor, LBP, de clasificación por Clustering, SVM, K-means y de aprendizaje por Anfis.

- **Reconocimiento de patrones:**

Para nosotros los seres humanos es fácil reconocer un rostro, entender palabras habladas, leer caracteres escritos a mano, identificar nuestras llaves del carro en nuestro bolsillo por tacto y decidir si una fruta está madura por su olor, todo esto es un acto de reconocimiento de patrones. Los sistemas computacionales que permiten el reconocimiento, descripción, clasificación y agrupamiento de patrones están estrechamente relacionados con el análisis

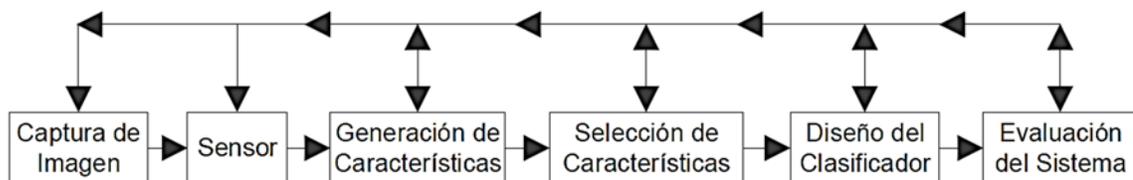
de datos y la taxonomía en el siguiente sentido: cualquier patrón debe ser descrito por un cierto número de parámetros o relaciones entre los parámetros; reconocer un patrón significa identificar un patrón o extraer información de sólo sus parámetros o propiedades (Jambu, 1991). Para llegar a una definición más acertada es necesario definir "Patrón", Watanabe, (1985) lo define como lo opuesto a un caos, y puede ser por ejemplo imágenes de huellas dactilares, palabras escritas en letra cursiva, un rostro humano o una señal, dado el patrón puede ser reconocido o clasificado tanto por rutinas clasificadoras supervisadas o no-supervisadas.

El diseño de un sistema de reconocimiento de patrones involucra tres aspectos tales como la adquisición y pre-procesamiento, representación de datos y toma de decisiones. En cada uno de estos aspectos (Figura 2-11) existen problemas de selección de sensores, parametrización de pre-procesamiento, esquemas de representación y modelos de toma de decisión así como también la determinación de las clases y categorías de selección, clasificación o agrupamiento (Jain, Duin, & Mao, 2000).

Dentro del ámbito de reconocimiento de patrones estadístico se tienen dos modos: uno que es el entrenamiento y el otro la validación, pero en general se tiene las siguientes etapas:

- Recolección de Datos
- Escoger Características
- Escoger Modelo
- Tipo de Entrenador para Clasificación (ej. Bayesiano)
- Evaluar Clasificador (cuantificación del Error)

**Figura 2-11.** Proceso de reconocimiento de patrones



Fuente: Elaboración propia.

- **Extracción de características:**

La extracción de características se realiza después de la fase de pre-procesamiento de los datos, la principal tarea del reconocimiento de patrones es tomar un patrón de entrada y asignarlo a una de las posibles clases de salida consideradas, la elección de características es fundamental para todo el proceso dado que el clasificador no podrá reconocer de características pobremente elegidas. Los criterios para escoger las características dadas según Lippman son: “las características deben contener la información necesaria para distinguir entre clases, ser insensibles a la variabilidad en la entrada, y también deben ser limitadas en número, para permitir la computación eficiente de las funciones discriminantes y limitar la cantidad de datos de entrenamiento requeridas”

La extracción de características es el proceso para recuperar los datos más importantes (conjunto de características) de los datos en bruto, lo que maximiza la tasa de reconocimiento con la menor cantidad de elementos y generar el conjunto de características similares para la variedad de instancia de la misma clase.

Los métodos de extracción de características ampliamente utilizados en aplicaciones de problemas de visión son: comparación de plantillas, plantillas deformables, transformadas de imagen unitaria, histogramas de proyección, perfiles de contorno, zonificación, momentos geométricos invariantes, momentos de Zernike, los descriptores de Fourier, gradientes y características de Gabor (Kumar & Bhatia, 2014).

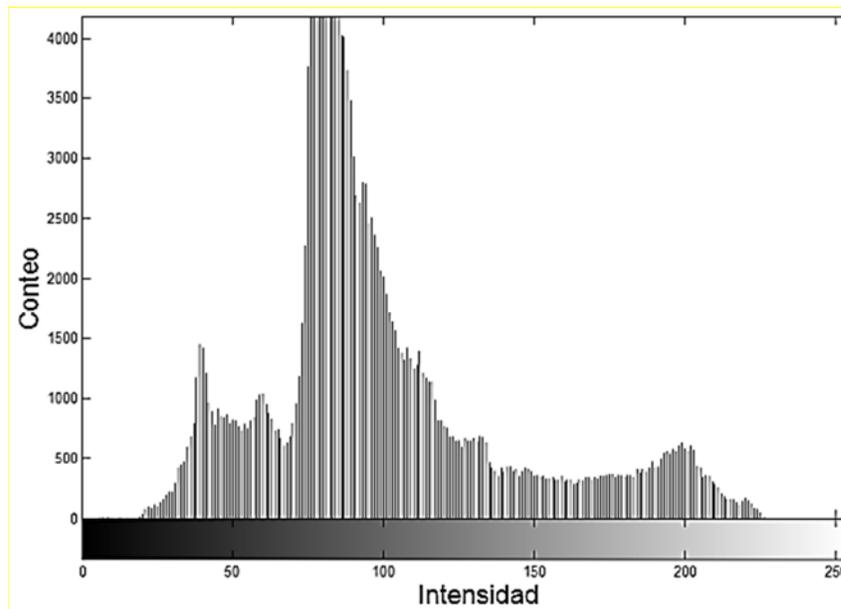
Dentro del análisis de imágenes los tipos de características más conocidos se pueden mencionar: características espaciales, de transformación, de bordes y fronteras, de color, de forma y de textura.

**Características espaciales:** las características espaciales de un objeto se determinan por su nivel de gris, intensidad y distribución espacial. La intensidad es una de las características más simples y más importantes del objeto. Por ejemplo en las imágenes de rayos X, la intensidad representa las características de absorción de las masas corporales, permite la diferenciación de los huesos de los tejidos.

**Características de histograma:** Un histograma de una imagen se refiere a valores de intensidad de píxeles. Este muestra el número de píxeles de una imagen para cada valor de intensidad. En la Figura 2-12 se muestra el histograma de una imagen y su distribución

de píxeles entre los valores de escala de grises. La imagen de escala de grises de 8 bits tiene 256 posibles valores de intensidad. El análisis estadístico derivado del histograma permite comparar contrastes e intensidades entre imágenes. Algunas de las características del histograma son la media, la varianza, la energía, la asimetría y la kurtosis (Myint, 2001).

**Figura 2-12.** Histograma de una imagen



*Fuente: Elaboración propia.*

**Características de transformación:** En general, la transformación de una imagen al dominio de la frecuencia entrega información descriptiva. Las características de transformación se extraen usando un filtrado de zona o también llamada característica de máscara. Las componentes de alta frecuencia se utilizan comúnmente para la detección de bordes y fronteras. Las hendiduras angulares se pueden utilizar para la detección de la orientación.

**Características de borde y frontera:** La detección de bordes es una de las tareas más difíciles en imágenes con bordes difusos por lo tanto es un problema fundamental en el procesamiento de imágenes (Asner & Heidebrecht, 2002). Los bordes de las imágenes son las zonas donde se presentan cambios o saltos de intensidad en un píxel a otro. La detección de bordes de una imagen reduce significativamente la cantidad de datos y filtra la información poco importante, mientras se mantienen las propiedades importantes de

una imagen. Los bordes son dependientes de la escala y un borde puede contener otros bordes, pero a una cierta escala. Las propiedades tales como área, perímetro y la forma se pueden medir fácilmente, por lo tanto los bordes se utilizan para la estimación de frontera y la segmentación de una imagen. Algunos operadores conocidos son Sobel, Robert, Prewitt y Canny.

**Características de color:** Las características de color se pueden derivar de un histograma de la imagen. La debilidad de histograma de color es que el histograma de color de dos imágenes diferentes con el mismo color puede ser igual. Las características de color aún son útiles para muchas aplicaciones de procesamiento de imágenes biomédicas tales como la clasificación celular, la detección de células cancerosas y los sistemas basados en el contenido de recuperación de imágenes (*Content Based Image Retrieval-CBIR*).

**Características de forma:** La forma de un objeto se refiere a su estructura física y perfil. Las características de la forma se usan principalmente para buscar y comparar formas, el reconocimiento de objetos o realizar mediciones de las formas. Momento, el perímetro, el área y la orientación son algunas de las características que se utilizan para la técnica de extracción de características de forma. La forma de un objeto está determinada por su frontera externa y abstracción de otras propiedades tales como el color, el contenido y la composición del material, así como de otras propiedades espaciales del objeto.

**Características de textura:** La textura es un patrón repetido de la información o la disposición de la estructura con intervalos regulares. En un sentido general, la textura se refiere a las características y apariencia de un objeto determinado por el tamaño, forma, densidad, disposición y la proporción de sus partes elementales de la superficie. La extracción de estas características se puede realizar por métodos estadísticos, estructurales, basadas en modelos y transformación de la información.

La extracción de características de textura es una función clave en diversas aplicaciones de procesamiento de imágenes como la teledetección, imágenes médicas y recuperación de imágenes basado en contenido.

- **Extracción de características basada en la estructura:** El enfoque de estructura representa la textura por primitivas definidas en una disposición jerárquica espacial. La descripción de la textura necesita la definición primitiva. La ventaja de la extracción de

características basada en el método estructural es que proporciona una buena descripción simbólica de la imagen. Este método no es adecuado para las texturas naturales debido a la variabilidad de la micro-textura y macro-textura.

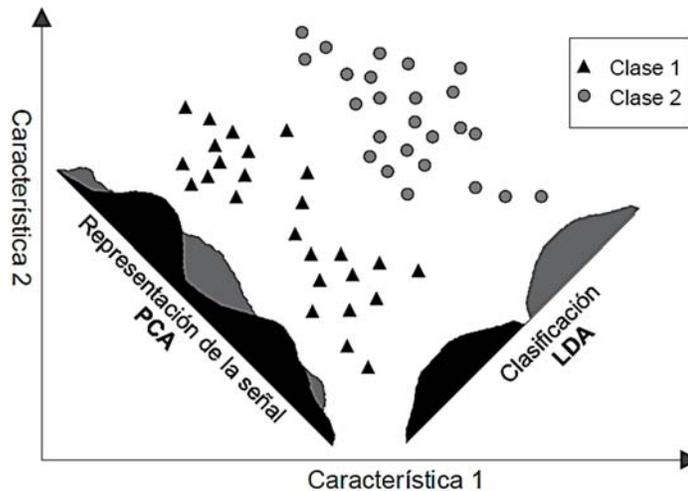
- **Extracción de características basada en modelos:** Análisis de textura basado en el Modelo tal como el modelo fractal y el modelo de Markov se basan en la estructura de una imagen que se puede utilizar para describir la textura y la síntesis de la misma. Estos métodos describen una imagen como un modelo de probabilidad o como una combinación lineal de un conjunto de funciones básicas. El modelo fractal es útil para modelar ciertas texturas naturales que tienen una calidad estadística de rugosidad a diferentes escalas y la auto similitud, y también para el análisis de la textura y la discriminación.
- **Extracción de características por transformación:** Los métodos de transformación, tales como Fourier, Gabor y transformadas wavelet representan una imagen en el espacio 2D, cuyo sistema de coordenadas tiene una interpretación que está estrechamente relacionado con las características de una textura. Los filtros de Gabor proporcionan medios para una mejor localización espacial pero su utilidad es limitada en la práctica, porque normalmente no hay resolución del filtro único donde se puede localizar una estructura espacial en texturas naturales. Estos métodos involucran la transformación de imágenes originales mediante el uso de filtros y el cálculo de la energía de las imágenes transformadas. Estos se basan en el proceso de la imagen entera que no es bueno para algunas aplicaciones que están basadas en una parte de la imagen de entrada.
- **Extracción de características estadísticas:** Los métodos estadísticos caracterizan la textura indirectamente de acuerdo a las propiedades no deterministas que manejan las relaciones entre los niveles de gris de una imagen. Los métodos estadísticos se emplean para analizar la distribución espacial de los valores de gris calculando las características locales en cada punto de la imagen y la obtención de un conjunto de estadísticas a partir de las distribuciones de las características locales. Los métodos estadísticos se pueden clasificar en primer orden (un pixel), de segundo orden (par de píxeles) y de orden superior (tres o más píxeles).

Dentro de las técnicas reconocidas para la extracción de características estadísticas se tiene: extracción basada en histogramas, matriz de co-ocurrencia de niveles de gris y patrón binario local (LBP-“*Local Binary Pattern*”), este último es introducido como medida complementaria para el contraste local de la imagen. El operador LBP es asociado con el análisis tanto estadístico como estructural de textura. El LBP describe la textura con primitivas más pequeñas llamadas textons. Para cada píxel de una imagen, se produce un código binario por umbralización y sus vecinos con el valor del píxel central. Un histograma se ensambla para recopilar las ocurrencias de diferentes códigos binarios que representan diferentes tipos de bordes curvos, manchas, zonas planas, etc.

Luego de tener las características bajo alguna de las técnicas anteriormente mencionadas en ciertas circunstancias es necesario hacer una reducción dimensional de estas, con el objetivo de bajar el costo computacional y mejorar los índices de discriminación para la clasificación, para el cual las más comunes son:

**Análisis de las componentes principales (PCA):** El análisis de las componentes principales es una de las técnicas de análisis multivariable, cuyo objetivo es obtener un nuevo conjunto de variable ordenadas según su importancia, no correlacionadas entre si y que fuesen una combinación lineal de las originales. Geométricamente la transformación asociada al PCA se puede considerar como una rotación del sistema de coordenadas original a un nuevo sistema ortogonal cuyos ejes están ordenados en función de la varianza de los datos originales en esa dirección (ver Figura 2-13). Si las primeras componentes del nuevo conjunto de variables contienen la mayor parte de la variación de los datos, es de suponer que el subconjunto de estas variables describe correctamente los datos, reduciendo así la dimensión del espacio de características.

**Análisis discriminante lineal (LDA):** El objetivo del análisis discriminante lineal es reducir la dimensión de características preservando la mayor parte de la información discriminante entre clases. El método empleado para obtener la reducción de dimensiones es similar al de la PCA. Se proyecta el vector de características en un nuevo conjunto de ejes que se seleccionan de forma que ellos maximicen la separación entre clases.

**Figura 2-13.** Criterio de extracción de características para transformaciones lineales

Fuente: Tomada y redibujada de <http://stats.stackexchange.com/questions/161362/supervised-dimensionality-reduction>

- **Selección de características:**

En la extracción de características se extrajeron las características que pueden tener mayor índice de discriminación, mientras que en la selección de características, se selecciona un subconjunto del conjunto original de características. La idea principal de la selección de características es la reducción de dimensiones, el cual consiste en elegir un subconjunto de características que representen un patrón seleccionado, con el fin de mantener tan pequeña como sea posible la dimensionalidad de la representación de patrones (número de características). Esto está asociado al costo de medición y precisión en la clasificación. Si se reduce el número de características demasiado, se podría generar a una pérdida en la capacidad de discriminación del clasificador y por ende la disminución de la precisión del sistema de reconocimiento (Jain et al., 2000).

- **Clasificadores**

En los sistemas de reconocimiento de patrones se tienen cuatro enfoques donde los más reconocidos son:

**Clasificación estadística:** Es un enfoque que define una frontera de decisión determinada por la distribución de la probabilidad de los patrones pertenecientes a cada clase. Para ello es necesario representar los patrones en términos de características o medidas con el objetivo de escoger que características son pertenecientes a una categoría o clase.

**Clasificación sintáctica o estructurada:** Esta adopta una perspectiva jerárquica donde los patrones son compuestos por sub-patrones y así entre sí mismos, el sub-patrón más simple es llamado primitiva. El reconocimiento de patrones sintácticos es analógicamente representado por sentencias de un lenguaje. Las primitivas son como el alfabeto y las sentencias son organizadas en forma gramática creando reglas que describen una clase.

**Redes neuronales:** Son un sistema computacional que contiene una red de interconexiones ajustables (pesos) entre procesadores muy simples. Según su arquitectura (feed forward- multilayer perceptron) permite ser empleadas para clasificación, clustering y extracción de características. Una de sus principales ventajas es que permiten aprender complejas relaciones no-lineales de entrada-salida. También permite su implementación en sistemas embebidos ya que está basado en un algoritmo (Jain et al., 2000). El entrenamiento de los clasificadores puede ser supervisado o no supervisado:

La **clasificación supervisada** se refiere a que en el entrenamiento se cuenta con un conocimiento a priori, es decir que se dispone de los datos ordenados con sus características y categorías o clases.

La **clasificación no supervisada** o clustering consiste en la agrupación de datos, en el cual no se conocen sus características ni categorías. Esta clasificación tiene como objetivo construir una frontera de decisión sobre la base de datos de entrenamiento, uno de los problemas que tiene la no-supervisión es que los datos pueden revelar agrupaciones con diferentes formas, tamaños y el número de grupos en los datos a menudo depende de la resolución.

#### ▪ Métricas de evaluación

Luego del entrenamiento es necesario medir el desempeño del clasificador el cual es evaluado a través de unas métricas que se representan por tasas de error. Para los entrenamientos supervisados se dividen las muestras totales en un porcentaje para su entrenamiento y el resto para su evaluación de desempeño. La tasa de error está relacionada con la matriz de confusión ya que hace las relaciones entre la cantidad de muestras mal clasificadas y las bien clasificadas, para ellos se tienen las siguientes métricas: MAE (*Mean Absolute Error*), RMSE (Root Mean Squared Error), TP Rate (True

Positive Rate), FP Rate (False Positive Rate), Precision, Recall y ROC (Receiver Operating Characteristic).

## 2.3 Estado del Arte

Se aborda el estado del arte de manera cronológica desde 1997 hasta la actualidad. La manera de estimar el espesor con técnicas de no-contacto y no-destrucción ha venido cambiando y este ha sido un tema de gran importancia no solo para la industria manufacturera sino también para las industrias farmacéutica, alimenticia, electrónica y aeronáutica. Para esta última, los investigadores Heam & East (1997) encuentran una solución para determinar el espesor de la capa de hielo sobre el fuselaje de un avión, basada en la propiedad de refracción de la luz usando un haz de luz con longitud de onda por fuera de la región donde el hielo es altamente absorbente; el método aplica la luz con un ángulo de incidencia y esta se dispersa en todas direcciones creando unas franjas, que a través del procesamiento de la imagen captada por una cámara permite determinar la geometría de este y por ende el espesor. Pero esta técnica solo puede funcionar para superficies fijas y no en movimiento ya que usa algoritmos de alto consumo computacional para determinar el espesor a través de análisis de imágenes. Por otra parte, la industria de recubrimientos utilizan capas poliméricas en metales para protegerlos de la corrosión. Para la medición del espesor de recubrimientos se emplean técnicas como la desarrollada por Goldstein, (1998) donde a través de la reflexión y la espectroscopía de transmisión se determina el espesor de películas delgadas haciendo conteo de franjas y métodos de Fourier. Estos métodos son adecuados cuando se tiene poca información óptica del material, pero para procesos en línea de producción no servirían ya que solo se pueden realizar de manera estática en un laboratorio.

Para el 2003 y enmarcado por la corriente de la interferometría, Costantino, Martinez, & Torga, (2003) presentan el concepto de la interferometría de ancho de banda para la medición de espesores en un medio semitransparente que hace contraste con la técnica de interferometría de luz blanca. Apoyándose en el conocimiento del índice de refracción se puede determinar el espesor en una película con alta dispersión. Esta técnica mide espesor de películas de aceite dejando abierta la investigación para películas poliméricas que hayan tenido cambio en su índice de refracción.

Otra técnica de no contacto aparece en el 2004, la cual consiste en determinar la variación en altura entre superficies. Kitagawa, (2004) emplea la técnica de medición de perfil de la superficie que utiliza la interferencia óptica, esta se usa ampliamente en la industria como un método sin contacto y no destructivo para medir con rapidez y precisión el perfil de las superficies microscópicas. A partir del 2005 la componente computacional toma protagonismo y los análisis se convierten en problemas algorítmicos. Con la necesidad de hacer mediciones con métodos de no-contacto y con rápida respuesta, He, Cabestaing, Postaire, & Zhang, (2005) realizan una investigación del uso complementario de las técnicas computacionales FFT (*Fast Fourier Transform*) y DFT (*Discrete Fourier Transform*) para la medición de espesor en botellas de vidrio a través de un interferómetro laser sin embargo presenta problemas debido a que no se conoce con exactitud la intensidad de la fuente de luz, adicionalmente se requiere de un algoritmo predictivo discreto para la estimación del espesor, esto trae consigo un componente computacional de los sistemas de medición cada vez más robustos, ya que en condiciones normales hay ruido e imprecisiones en los montajes para la mediciones aplicadas a la industria, como por ejemplo el proceso de foto-revelado donde se requiere controlar el espesor de la película fotosensible cuando es disuelta por un solvente.

La apertura económica y el crecimiento competitivo de productos comerciales en el campo de la óptica llevan a Tay & Lee, (2006) a usar un espectrómetro comercial con un método computacional robusto para la estimación del espesor de la película aplicando tres técnicas llamadas *Fringe Order Computation* (FOC) que se basa en un análisis de picos y franjas, *Nonlinear Least Square Estimation* (LSE) - estimación de mínimos cuadrados no lineal y *Lookup Table Referencing* (LTR)- tabla de búsqueda por referencia. Estos métodos tiene el problema de que solo pueden ser usados en mediciones donde el cambio de espesor sea lento (15 segundos).

Cada vez que la tecnología va avanzando en temas de velocidad de procesamiento, también las nuevas técnicas ópticas van adoptando el uso de alta frecuencias, para el cual se tiene la propuesta de Ellrich, Theuer, Torosyan, Jonuscheit, & Beigang, (2008). Para películas multicapa los autores proponen una técnica llamada THz basada en la generación de un pulso a frecuencias de Tera Hertz dentro las regiones visible o infrarrojo. Esta técnica se utiliza en películas opacas. Uno de los inconvenientes es que se requiere conocer el índice de refracción de la película y el procesamiento está en el rango de los

picosegundos. El artículo no investiga películas plásticas deformadas en el cual ha variado el índice de refracción según el esfuerzo termo-mecánico aplicado a la película.

Después del 2006, se presenta un mejoramiento en las cámaras digitales, que conllevó a la generación de nuevas técnicas de análisis de imágenes. En el trabajo de Yang, Wang, Lv, & Li, 2009, Se utiliza un principio básico de medición utilizando un láser de línea-estructurada basándose en la refracción y reflexión; estas líneas son capturadas por un sensor CCD el cual la distancias entre la línea representan una relación directa con el espesor, esta técnica es rápida y se ajusta a las necesidades de los procesos industriales para la inspección en línea. Sin embargo esta técnica no se ha investigado en películas semi-transparentes. C. J. Tay, Quan, & Li, (2010), utilizan una técnica llamada Proyección de Franjas dentro de la interferometría con luz blanca para la medición de espesor de películas multicapa con diferente índice de refracción usando la primera capa como referencia. Esta técnica de medición está destinada para materiales semiconductores y no evalúan con películas multicapa poliméricas.

El siguiente método descrito por Hlubina & Lunacek, (2011) explica que con la recuperación de fase a partir del interferograma espectral obtenido por un interferómetro de Michelson y combinado con la reflectometría, esta fase interferométrica de la película delgada se mide al utilizar una muestra en la que se conoce su cambio de fase por reflexión. La refléctancia espectral de la película delgada también se mide en el interferómetro. El problema para hallar el espesor es que requiere conocer las constantes ópticas para todos los materiales implicados.

En la mayoría de los casos se desconocen las propiedades ópticas del material a evaluar y además no solo es requerido medir un punto específico sino también un área o zona. Kitagawa, (2012) explica que la espectroscopia básicamente mide un solo punto a la vez, y la resolución espacial es limitada y propone un nuevo método de medición de espesor de la película superficial mediante un algoritmo de ajuste del modelo global desarrollado para perfilar la superficie interferométrica de tres longitudes de onda. La distribución del espesor de película se estima una imagen en color capturada por una cámara a color con iluminación de tres longitudes de onda. Por tratar de cámaras de color se requiere un ambiente lumínico controlado y además la película debe estar sobre un sustrato, por lo tanto se trabaja con películas multicapa ni de manera temporal.

Luego del análisis del ámbito de estimación del espesor se encuentran problemas de procesamiento computacional, el desconocimiento de las propiedades ópticas del espécimen y análisis de imágenes. Otro ámbito que se requiere abordar es sobre los métodos y técnicas para el análisis de los esfuerzos mecánicos resultante cuando es sometida a termodeformación la película plástica en cuestión.

En Colombia se ha adelantado resultados importantes como el trabajo de Briñez de Leon, (2013) donde propone el desarrollo de una metodología para la caracterización de la deformación de películas plásticas termodeformables utilizando técnicas para el análisis de imágenes basadas en los cambios que experimentan los colores de interferencia generados durante el proceso. En este trabajo se utilizaron muestras de películas plásticas que fueron sometidas a tracción mecánica y complementada con montajes ópticos de polarización, el cual son utilizados para la observación del fenómeno de fotoelasticidad. A través de una cámara de video digital se capturaron los cambios de los colores de interferencia durante el proceso de deformación. La deformación mecánica genera estiramiento de la película y este se adelgaza en zonas de mayor esfuerzo. En el trabajo de Briñez no se incluyó la carga térmica para aproximar el verdadero proceso de termodeformado en la industria.

Partiendo de la corriente de la fotoelasticidad como una técnica, usada por varias décadas, para aproximar la detección de zonas de mayor esfuerzo en piezas no solo plásticas sino también metálicas, se puede apreciar la inclusión y adopción de la tecnología digital que trae consigo técnicas de procesamiento digital de franjas dentro de las cuales se encuentran; análisis de espectro, técnica de desplazamiento de fase "*phase stepping*" y métodos de Fourier.(Patterson, 2002).

Cinco años antes los autores Rarnesh, Govindarajan, & Engineering, (1997) expresaron que en la mayoría de sistemas de procesamiento de imágenes utilizan software ligado al hardware. Ellos proponen un software portable que puede mejorar las metodologías de tratamiento de imágenes incorporando técnicas de cambio de fase, transformada de Fourier y otros. Este concepto puede acoplarse para la determinación de cambios de orden en las franjas, ya que los cambios de orden son uno de los desafíos más importante para la determinación de los esfuerzos mecánicos presentado en la película plástica multicapa.

Para la fotoelasticidad digital, los espacios de color seleccionados son determinantes para la detección de características ópticas del material. Uno de los más usados son el RGB y en el trabajo de Jones & Wang, (2003) se presenta un nuevo enfoque donde se apoya en la técnica existente de fotoelasticidad RGB. En este trabajo se usa un juego de combinaciones de valor de franja isocromática medida en los tres planos o canales de color en lugar del método RGB habitual de hacer coincidir directamente combinaciones de los planos de color. También, Jones & Wang proponen una función de dispersión donde se establece un peso por cada canal de color. Sin embargo se observaron pequeños errores en las áreas de las franjas de alto gradiente. También Grewal, Dubey, & Claremont, (2006) presentan una solución alternativa rentable a la técnica RGB convencional utilizando un escáner plano, el sistema es capaz de demodular altas órdenes de franja e incorporar información para llevar a otros espacios de color.

Un factor común en la experimentación con fotoelasticidad es la fuente de luz empleada y tienen diferencias que son explicadas en el trabajo de Ajovalasit, Petrucci, & Scafidi, (2010) donde los desarrollos principales de la técnica de fotoelasticidad por RGB para la medición de retardos han revelado que las fuente de luz incandescente permite encontrar retardos hasta de cuatro (4) cambios de orden de franjas y que las fuentes fluorescentes permiten determinar hasta de doce (12) cambios de orden debido a su espectro discreto. Para el análisis de las franjas de color se tienen varios desafíos para su caracterización llevando a Zuccarello, (2005) a realizar un método que está basado en la transformada de Fourier y el desenvolvimiento de franjas. El trabajo de Zuccarello consiste en adquirir dos imágenes isocromáticas con diferentes cargas, estas imágenes son procesadas por una rutina de cálculo simple que permite determinar el retraso de fase evidenciándolo en una franja isocromática en cualquier línea arbitraria elegida, sin la necesidad de información externa. Esta técnica es usada en un montaje con fuerza ejercida a compresión y estaría abierta la opción de experimentación con fuerza aplicada a tensión. Continuando con los desafíos de caracterizar las franjas se tiene que en la fotoelasticidad digital los contornos isoclínicas e isocromáticos no están definidos y aparecen con ruido en el mapa de fase el cual afecta negativamente a la separación de los esfuerzos, por tal razón se propuso un nuevo algoritmo de suavizado adaptativo para eliminar el ruido (Kasimayan & Ramesh, 2011).

El problema de bordes difusos entre las franjas de color, genera la necesidad de detectar bordes en función de ayudar a resaltar, clasificar y segmentar las franjas obtenidas por la fotoelasticidad digital. Los autores Chang & Sliz, (2009) discuten el desarrollo de un nuevo algoritmo para detectar la máscara del modelo mediante el análisis de patrones de franjas isocromáticas resultantes por la fotoelasticidad. Es importante conocer la máscara del modelo para su análisis y obtener un mapa de esfuerzos. Este algoritmo solo sirve para detectar los bordes externos o por fuera del área de análisis y no sobre las franjas.

La textura es un descriptor importante para la clasificación y segmentación de las franjas de color. Algunos de los métodos empleados para la caracterización de la textura son estadísticos como las matrices de co-ocurrencia, métodos geométricos, basados por el modelo y patrones binarios locales utilizados para realizar un análisis de textura con tolerancia al ruido lo propone Fathi & Naghsh-Nilchi, (2012).

Las franjas de color y la correlación digital de imágenes (DIC – “Digital Image Correlation”) han ganado considerable atención en los últimos años por la simplicidad ya que no requiere complicados equipos y métodos de óptica, además no se requieren pos-procesamiento de imágenes, análisis de patrones de franjas ni desenvolvimiento de fase (Abshirini, Dehnavi, Beni, & Soltani, 2014).

Uno de los problemas encontrados para la realización de estas técnicas es la calibración del montaje para poder garantizar la repetitividad de los experimentos y para ello es necesario tener en cuenta estándares normalizados como son: ASTM D6988-13 que es la guía para determinar el espesor de una película plástica, ASTM 882-12 es un método para pruebas de propiedades de tracción de láminas de plástico delgada, ASTM D4093 - 95 es un método estándar de prueba para mediciones fotoelástico de birrefringencia y la tensión residual en materiales plásticos transparentes o translúcidos.

## **3. Desarrollo Experimental**

### **3.1 Metodología**

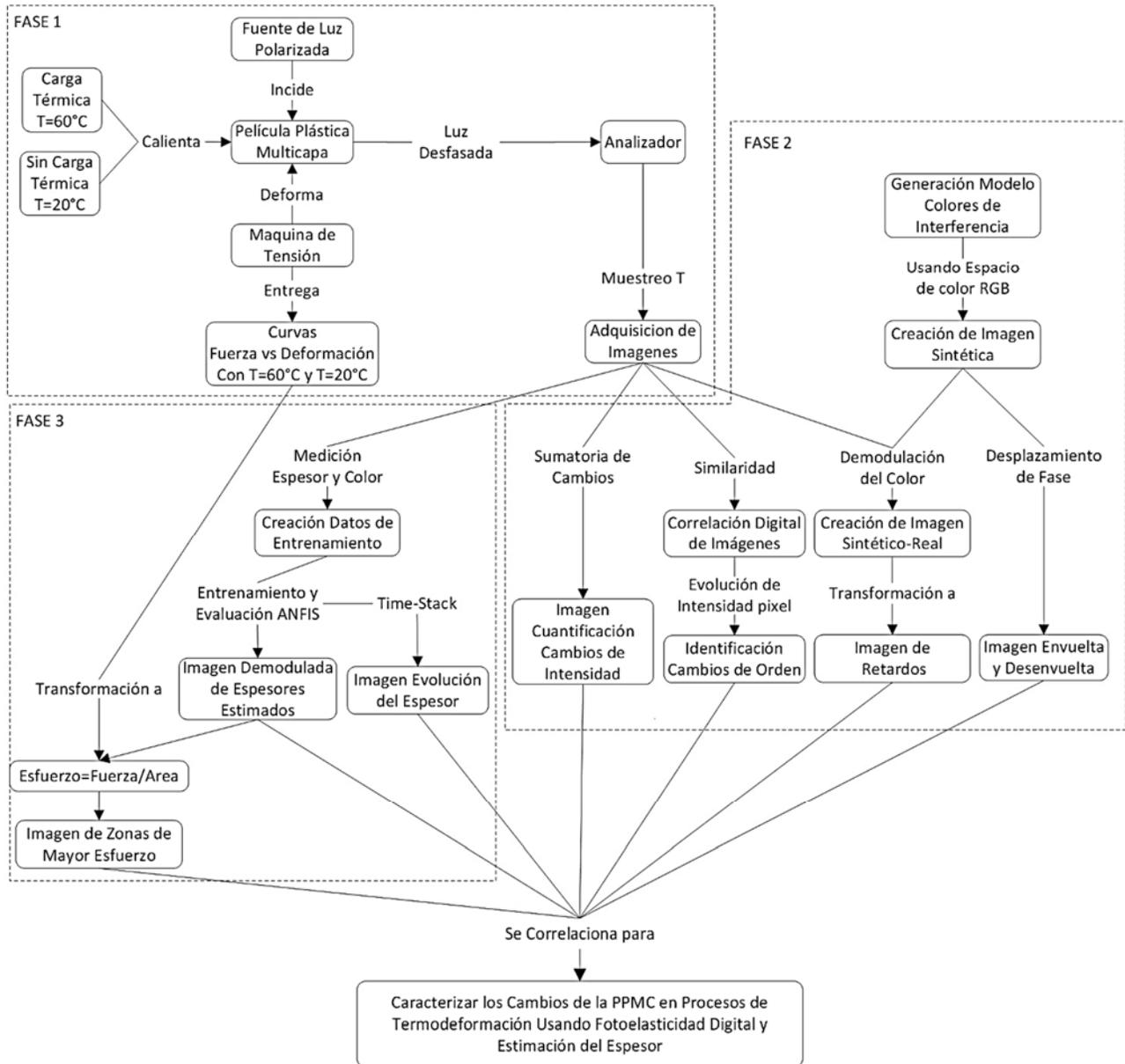
La metodología empleada para el desarrollo de este trabajo de investigación es de tipo analítico, experimental y correlacional, por lo tanto se requiere aplicar técnicas asociadas al análisis y procesamiento de imágenes de fotoelasticidad realizando una comparación de los resultados de los experimentos bajo deformación a temperatura ambiente (20°C) contra la deformación a  $T=60^{\circ}\text{C}$ .

El desarrollo experimental se divide en tres fases. La primera es la caracterización del montaje de termodeformación y adquisición de imágenes de fotoelasticidad, la segunda es la adquisición y procesamiento de imágenes con técnicas de fotoelasticidad digital y la tercera busca la estimación del espesor bajo el uso de técnicas de aprendizaje inteligente y clasificación de las zonas de esfuerzos.

En la primera se realiza la selección de equipos de adquisición y termodeformación, ajuste del color de la cámara digital, medición del espectro en la fuente de luz, verificación de estabilidad del color en la cámara y configuración de la zona de medición de temperatura en la cámara termográfica. En la segunda fase (ver Figura 3-1) se adquieren los videos de fotoelasticidad tanto a  $T=20^{\circ}\text{C}$  como a  $T=60^{\circ}\text{C}$ . A estos se les aplican técnicas de correlación digital de imágenes para identificar variaciones del efecto de la temperatura en la deformación de las PPMC, en la generación de una imagen sintética de colores de interferencia, desenvolvimiento de fase, definición de los órdenes, comparación y conversión de color real vs color sintético y para la tercera fase las imágenes son procesadas por técnicas de clasificación y clustering con el objetivo de evidenciar relaciones entre las clases con los órdenes, también se emplea una técnica de aprendizaje para la estimación del espesor y a través de una herramienta de cuantificación como la detección de bordes y la segmentación poder determinar las diferencias entre

experimentos de deformación de la PPMC a  $T=20^{\circ}\text{C}$  y  $T=60^{\circ}\text{C}$ . A continuación se despliegan cada uno de los experimentos mencionados.

**Figura 3-1.** Diagrama de la metodología y sus procesos experimentales.



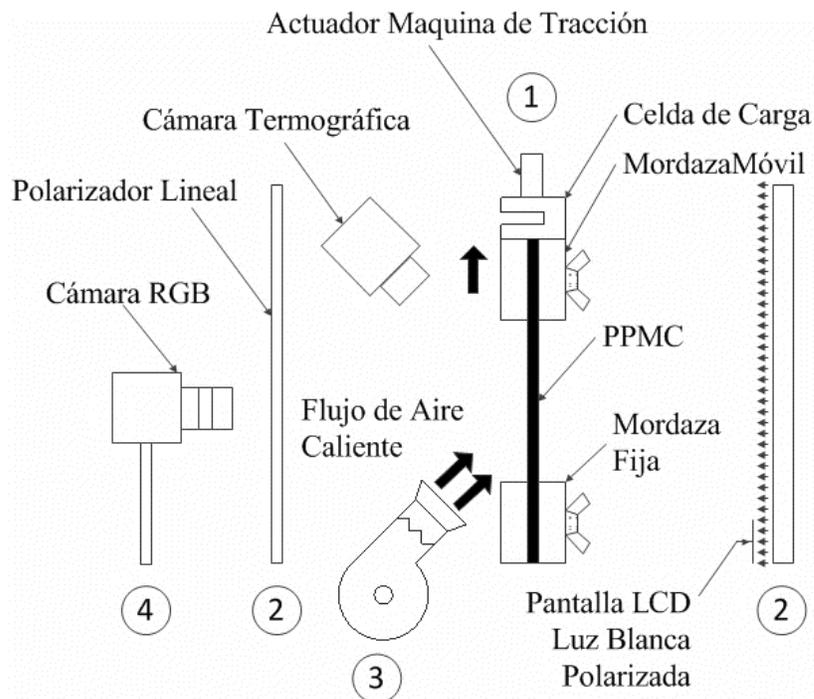
Fuente: Elaboración propia.

### 3.2 Montaje del sistema de fotoelasticidad digital y termodeformación

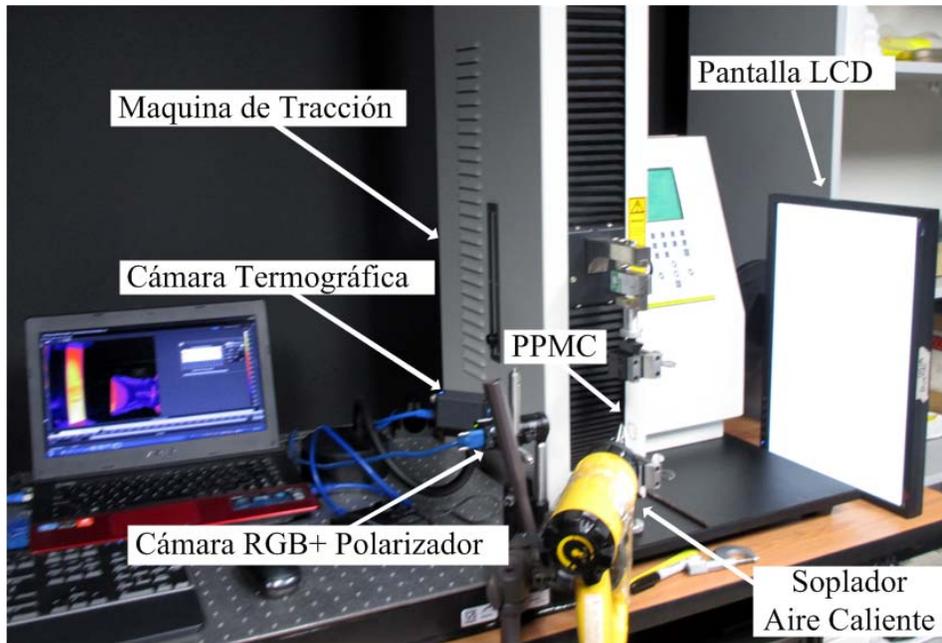
En el desarrollo del objetivo es necesario seleccionar los equipos adecuados para el montaje de fotoelasticidad digital, el cual involucra un sistema de adquisición de imágenes donde interviene una cámara RGB, una lente, fuente de luz y polarizadores. Para el proceso de termodeformación se tiene una máquina de tracción, un soplador de calor y una cámara termográfica. En la Figura 3-2 se muestra de manera simplificada el esquema del montaje integrado de fotoelasticidad con equipo de termodeformación y en la Figura 3-3 se muestra una fotografía del montaje.

**Figura 3-2.** Esquema general del montaje de fotoelasticidad digital con carga térmica.

Fuente: Propia



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3-3.** Fotografía del montaje de fotoelasticidad digital con carga térmica

Fuente: Tomada en el Laboratorio de Visión y Fotónica del ITM.

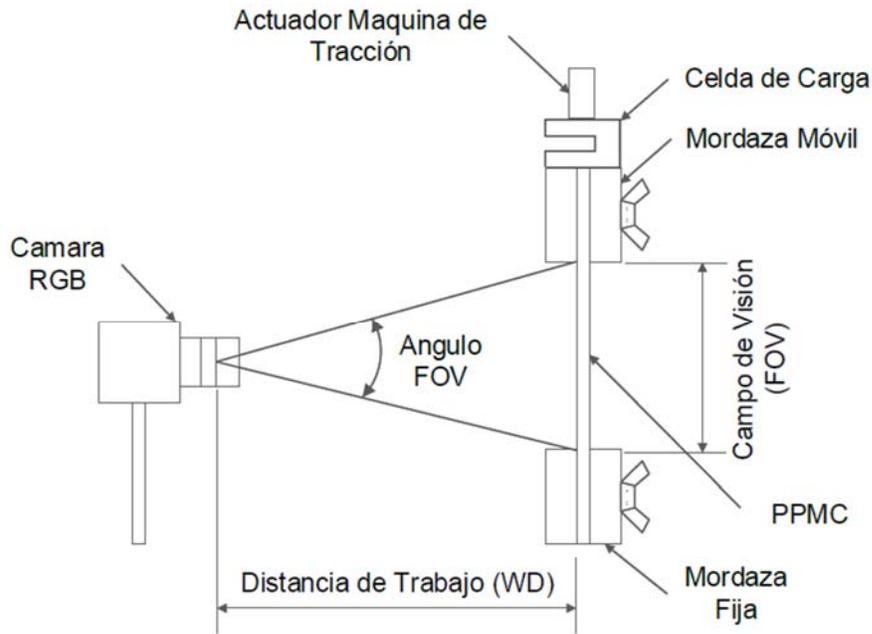
### 3.2.1 Selección de equipos de adquisición

El montaje mostrado anteriormente está compuesto por equipos de adquisición de imágenes y fueron seleccionados a partir de los cálculos asociados a las cámaras y lentes.

- **Selección de la lente y cámara:**

La película plástica tiene un ancho de 25mm, una longitud para la deformación de 100mm y se estima una deformación de 4 veces, pero el área de interés es la parte inferior con un ancho de 25mm y una altura de 50mm. Por lo tanto el campo de visión requerido aproximado es de 100mm el cual corresponde a un **lente de EDMUND referencia: K58-000** con longitud focal ( $FL$ ) de 8.5mm y un campo de visión ( $FOV$ ) de 150.7mm y un ángulo  $FOV(\theta)$  de  $39^\circ$  (ver Figura 3-4).

**Figura 3-4.** Factores para determinación del montaje de adquisición de video.



Fuente: Elaboración propia.

Con las dimensiones del lente y de la probeta despejamos la distancia de trabajo ( $WD$ ):

$$WD = \frac{FOV}{2 \cdot \tan(\theta/2)} \quad (3-1)$$

Tenemos  $FOV=150.7$  mm,  $\theta=39^\circ$

$$WD = \frac{150.7}{2 \cdot \tan(39^\circ/2)} \quad (3-2)$$

$$WD = 212.8mm \quad (3-3)$$

El lente escogido tiene  $FL$  de 8.5mm el cual se puede hallar el tamaño de la imagen " $h$ "

$$h = FL * \frac{FOV}{WD} \quad (3-4)$$

$$h = 8.5 * \frac{150.7}{212.8} \quad (3-5)$$

$$h = 6.02mm \quad (3-6)$$

Dentro del máximo formato de sensor para el lente seleccionado es el 1/2.5" el cual tiene un  $h_s=7.22$ mm, por lo tanto el  $h$  hallado es de 6.02mm el cual cumple para la **cámara** FL3-U3-88S2C-C.

$$PMAG = \frac{\text{tamaño del sensor}}{FOV} \quad (3-7)$$

$$PMAG = \frac{8.8}{150.7} \quad (3-8)$$

$$PMAG = 0.05839 \quad (3-9)$$

Resolución espacial del objeto (*OSR*):

$$OSR = \frac{2 * \text{tamaño del pixel}}{PMAG} \quad (3-10)$$

$$OSR = \frac{2 * 1.55}{0.05839} \quad (3-11)$$

$$OSR = 53.0875 \mu m \quad (3-12)$$

=> Cada pixel corresponde a 0.053mm de la imagen (2048 x 1080).

A continuación se presentan las especificaciones técnicas de los equipos seleccionados en el laboratorio de visión artificial y fotónica.

#### ▪ Cámara RGB

**Nombre:** Cámara a Color CCD (Figura 3-5)

**Fabricante:** EDMUND OPTICS

**Modelo:** FL3-U3-88S2C-C

#### **Especificaciones Técnicas:**

- Tipo de sensor: Sony IMX12 CMOS
- Área de Sensado H x V (mm): 5.8 x 4.3 (diagonal: 7.22mm)
- Formato del sensor: 1/2.5"
- Dispositivo de Imagen: Escaneo progresivo CCD
- Pixel (H xV): 4096 x 2160
- Tamaño del Pixel, H x V ( $\mu m$ ): 1.55 x 1.55
- Pixel Depth: 8, 12, 16 and 24-bit digital data
- Frame Rate (fps): 30

- Formatos de imagen: Y8, Y16, Mono8, Mono12, Mono16, RGB, YUV411, YUV422, YUV444, Raw8, Raw12, Raw16
- Salida de video: USB 3.0
- Montaje: C-Mount
- Dimensiones (mm): 29 x 29 x 30

**Figura 3-5.** Imagen de Cámara RGB Color USB 1/2.5"



*Fuente: Tomada de Equipos del Laboratorio de Visión Artificial y Fotónica.*

#### ▪ Lente

**Nombre:** Lente (Figura 3-6)

**Fabricante:** EDMUND OPTICS

**Modelo:** K58-000

#### **Especificaciones Técnicas:**

- Longitud Focal FL: 8.5 mm
- Max. Formato del Sensor: 2/3"
- Campo de Visión FOV: 246.9 mm – 60.8° (para sensor 2/3")
- Distancia de Trabajo WD: 200-∞
- Apertura: f/1.3
- Montaje: C-Mount

**Figura 3-6.** Lente de foco fijo de FL=8.5 mm



*Fuente: Tomada de Equipos del Laboratorio de Visión Artificial y Fotónica.*

**▪ Máquina de tracción****Nombre:** Dinamómetro para ensayos de tracción (Figura 3-7)**Fabricante:** Labthink**Modelo:** PARAM XLW (PC)

**Función:** Esta máquina es diseñada para examinar y medir las propiedades físicas y mecánicas (Probar y calcular el estrés al alargamiento fijo, módulo de elasticidad y tensión-deformación) de las películas de plástico, materiales compuestos, materiales flexibles para embalaje, tubos plásticos flexibles, líquidos adhesivos, cintas adhesivas, cintas sensibles a presión, vendajes medicinales adhesivos, papeles de lanzamiento, películas protectoras, tapas de cierre flip-off, papeles metálicos, diafragmas, tablas de celular solar, telas no tejido, cauchos y fibra de papeles. El equipo puede realizar varios tipos de ensayos como de tracción, peladura, deformación, rasgadura, sellado caliente, adhesivo, fuerza de punción, fuerza de apertura, fuerza de destapar y fuerza de desenrollar en baja velocidad etc.

**Especificaciones Técnicas:**

- Fuerza Max: 500N
- Precisión:  $\pm 0.5\%$  al dato leído
- Velocidad de prueba: 50, 100, 150, 200, 250, 300 ó 500mm/min
- Ancho de muestra: 30mm (Estándar)
- Alcance: 1000mm
- Tamaño del Equipo: 450mm(Largo) x 450mm(Ancho) x 1410mm(Alto)
- Energía: AC 220V 50Hz
- Peso neto: 68kg
- Normas : ISO 37, JIS P8113, ASTM E4, ASTM D828, ASTM D882, ASTM D1938, ASTM D3330, ASTM F88, ASTM F904, GB 13022, GB 8808, GB 1040, GB 4850, GB 7753, GB 7754, GB 453, GB/T 17200, GB/T 16578, GB/T 7122, GB/T 2790, GB/T 2791, GB/T 2792, GB/T 17590, QB/T 2358, QB/T 1130

**Figura 3-7.** Imagen de dinamómetro para ensayos de tracción

Fuente: Tomada de <http://en.labthink.com/en-us/product/xlw-pc-auto-tensile-tester.html>

#### ▪ **Soplador de calor**

**Nombre:** Pistola de Aire Caliente (Figura 3-8)

**Fabricante:** DEWALT

**Modelo:** D26411

**Función:** Este dispositivo está diseñado para entregar aire calentado a través de resistencias eléctricas.

#### **Especificaciones Técnicas:**

- Potencia absorbida: 2000 W
- Temperatura de funcionamiento: 50-600°C
- Flujo de aire: 250 / 450 l/min
- Peso: 0.80 kg
- Longitud: 253 mm
- Alto: 210mm
- Vibración Mano/Brazo: 0,86m/s<sup>2</sup>
- Presión sonora: 68dB(A)
- Presión Acústica: 79dB (A)

**Figura 3-8.** Imagen de Pistola de Aire Caliente 50-600°C



*Fuente: Tomada de Equipos del Laboratorio de Visión Artificial y Fotónica.*

#### ▪ **Micrómetro**

**Nombre:** Micrómetro (Figura 3-9)

**Fabricante:** MITUTOYO

**Función:** Este dispositivo está diseñado para realizar mediciones en el orden de las micras.

**Especificaciones Técnicas:**

- Apertura: 25mm
- Resolución= 0.00254mm ó 2.54µm

**Figura 3-9.** Micrómetro resolución 2.54µm



*Fuente: Imagen propia.*

## ▪ Espectrómetro

**Nombre:** Espectrómetro (Figura 3-10)

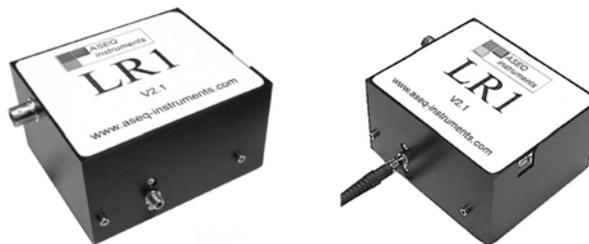
**Fabricante:** ASEQ INSTRUMENTS

**Función:** Este dispositivo está diseñado para realizar mediciones de espectro desde 200-1100 nm.

**Especificaciones Técnicas:**

- Detector: Toshiba TCD1304DG lineal (no patrones de interferencia)
- Rango de detección: 200- 1100 nm
- Resolución A/D: 16 bit
- Tiempo de exposición: 10 $\mu$ s - 60s
- Tiempo de muestro CCD: 14ms
- Capacidad de memoria: 64 espectros

**Figura 3-10.** Espectrómetro



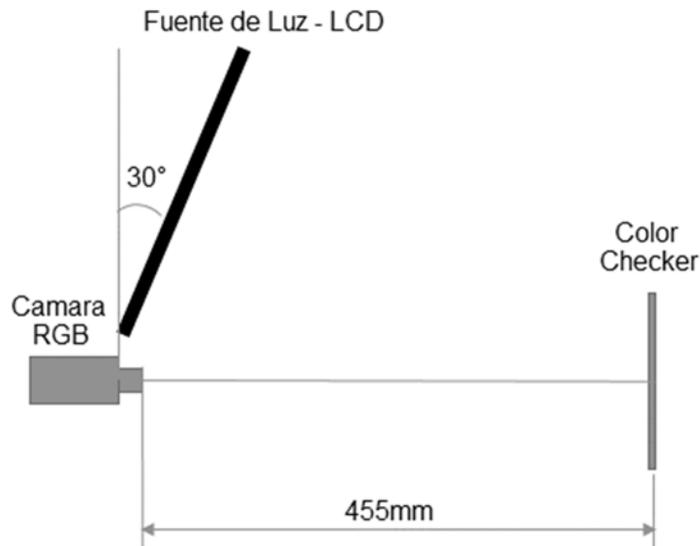
*Fuente: Tomada de Equipos del Laboratorio de Visión Artificial y Fotónica.*

### 3.2.2 Ajuste de color del sistema de adquisición

Para la calibración de color de la cámara RGB, se hizo un montaje como el que se ve en la Figura 3-11 en el cual se emplearon la fuente de luz que en nuestro caso es una pantalla LCD, la cámara RGB (Point Grey FL3-U3-88S2C-C), lente de foco fijo FL=8.5mm, y una paleta de colores estandarizados “Colorchecker classic X-rite” con 24 recuadros.

El procedimiento que se empleó para este ajuste de color fue tomar imágenes con diferentes parámetros modificados y comparar las intensidades R, G y B de los colores estandarizados de la paleta.

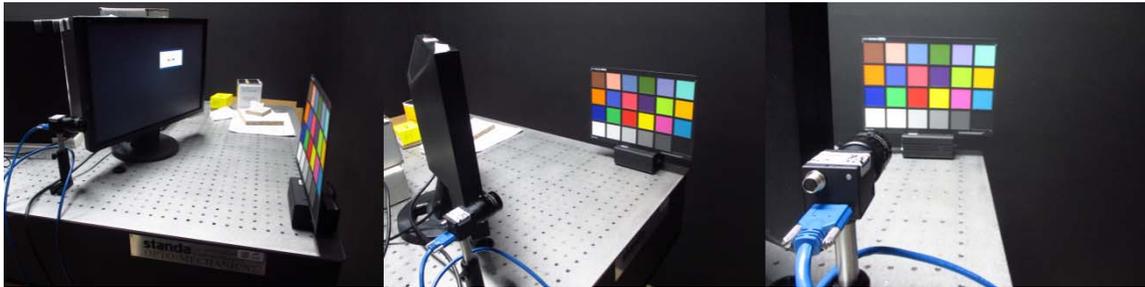
**Figura 3-11.** Esquema de montaje para experimento calibración del color



*Fuente: Elaboración propia.*

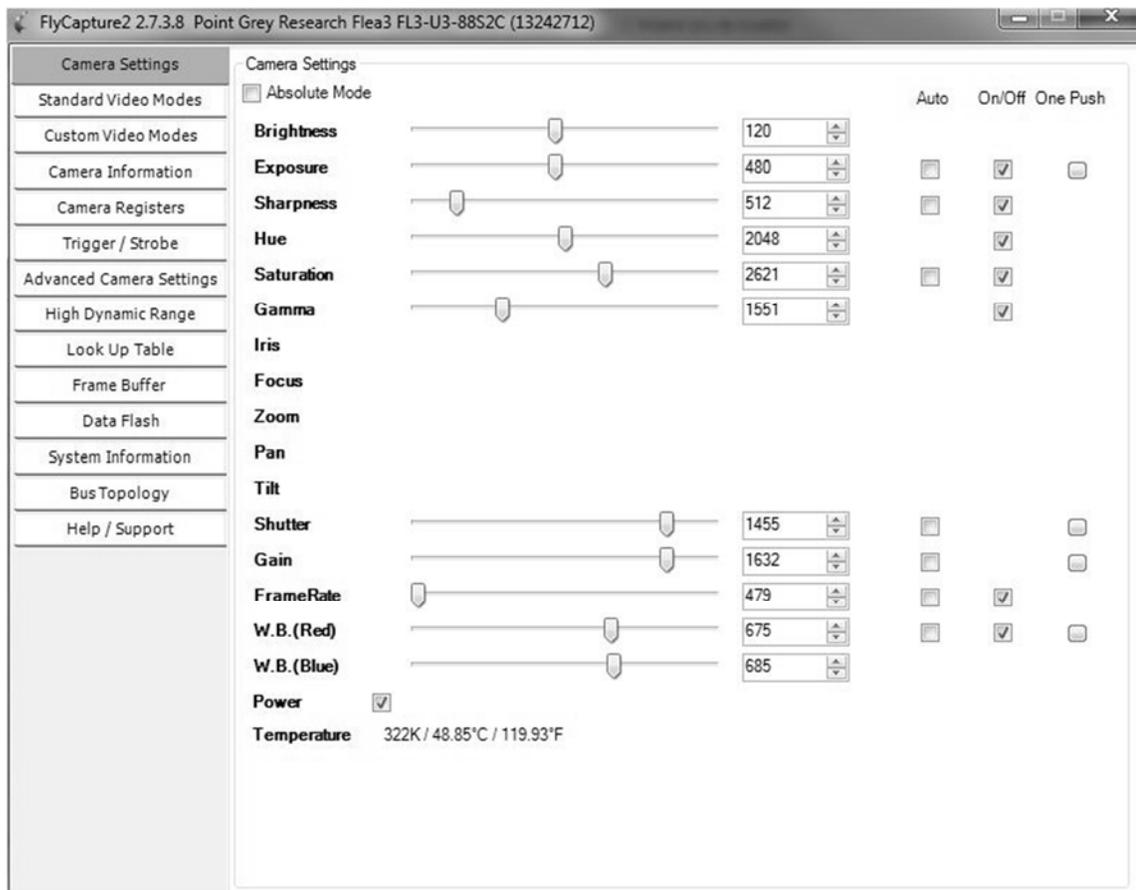
En la Figura 3-12 se muestran las fotos tomadas previamente al experimento. Inicialmente se apagan todas las luces del interior del laboratorio con el fin de que solo haya una sola fuente de luz directa a la paleta de color, posteriormente se adquiere una foto con la calibración inicial que tiene la cámara, se ajusta la intensidad de los recuadros blanco y el negro para evitar la saturación regulando el brillo, exposición, gamma y saturación de la pantalla de configuración de la cámara como se puede apreciar en la Figura 3-13 y posteriormente se realizan los ajustes en el Matiz (Hue) y balance de blancos con rojo y azul para ajustar los colores de acuerdo a la tabla de colorimetría del Colorchecker usado. En la Figura 3-14 se muestran las 20 configuraciones de calibración de color, el cual la configuración #3 fue a seleccionada (Ver la Figura 3-13) por estar dentro de los rangos de intensidad de los colores del color checker (sRGB).

**Figura 3-12.** Fotografía de montaje para experimento calibración del color.

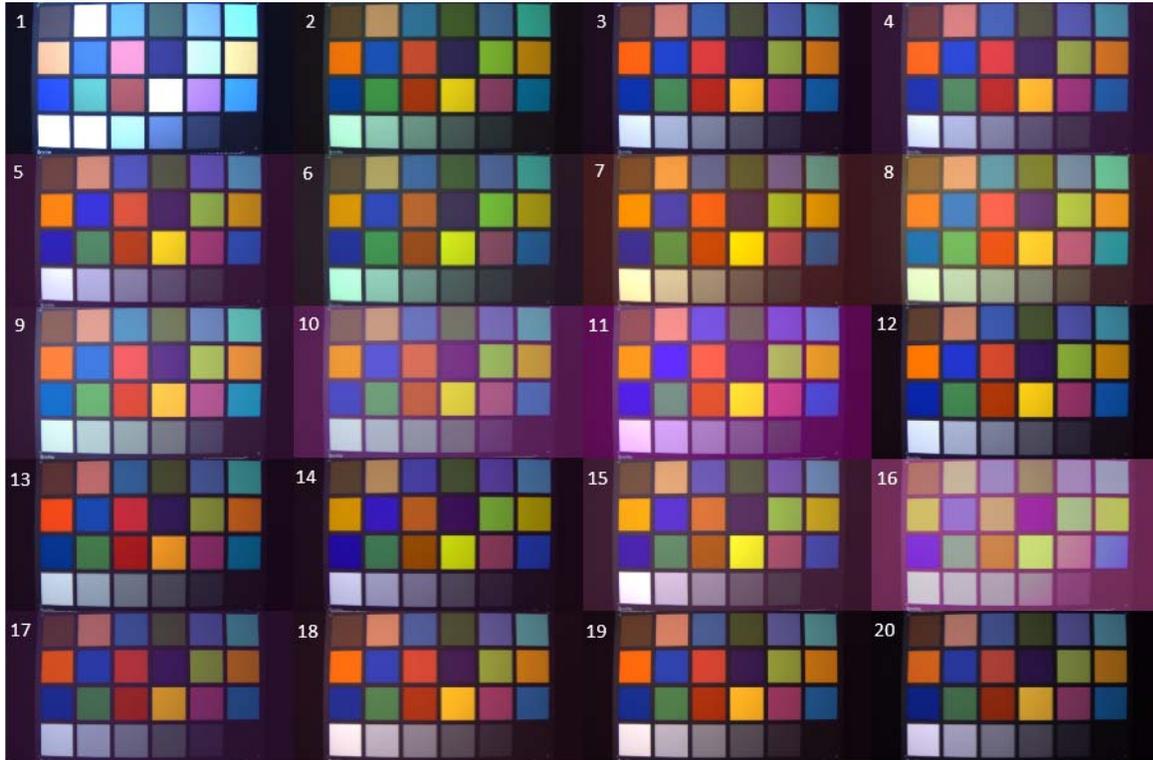


Fuente: Tomada del Laboratorio de Visión Artificial y Fotónica - ITM

**Figura 3-13.** Ajustes de parámetros de color de la cámara



Fuente: Tomada del software de la cámara FlyCapture2 versión 2.7.3.8.

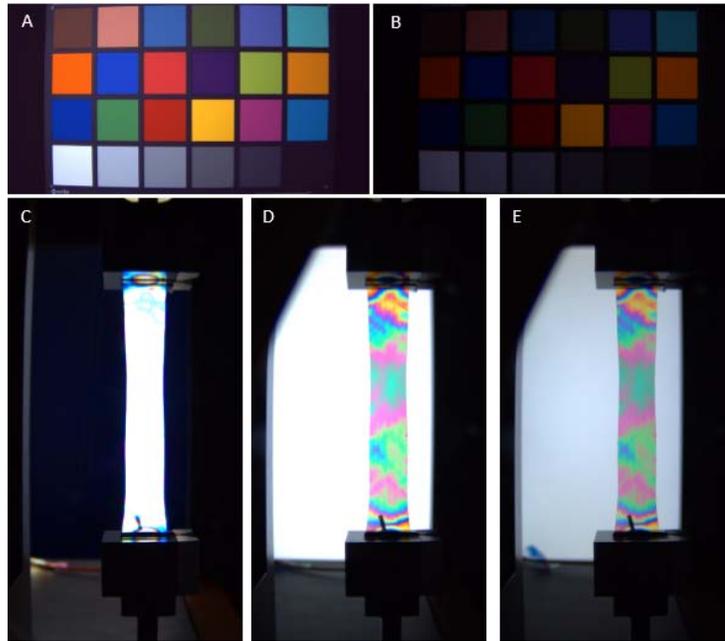
**Figura 3-14.** Imágenes adquiridas con diferentes ajustes de color de la cámara.

Fuente: *Elaboración propia.*

La Figura 3-15A corresponde a la imagen con calibración de color con luz indirecta, pero en el montaje de fotoelasticidad la cámara recibe luz directa y frontalmente el cual se afecta las imágenes adquiridas ya que se satura los colores como se puede ver en la Figura 3-15C con el polarizador y en la Figura 3-15D sin polarizador, por lo tanto es necesario hacer un ajuste de brillo y exposición para llevar de nuevo el blanco y el negro a los umbrales adecuados sin saturación.

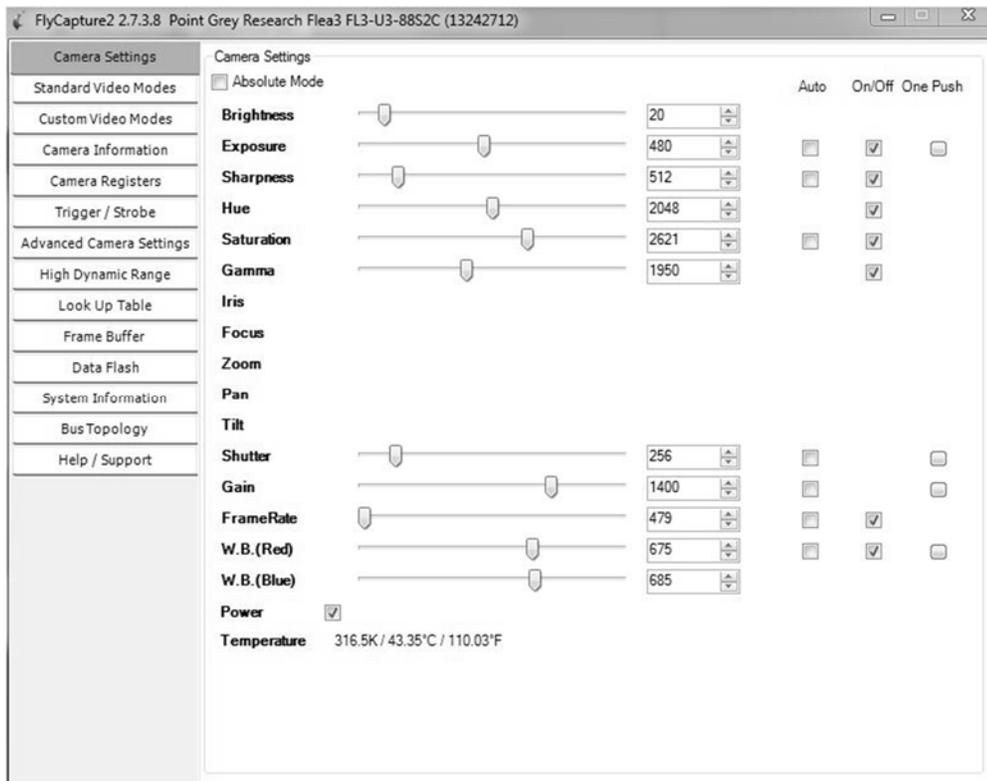
En la Figura 3-15E muestra la imagen con el ajuste, pero los colores pierden brillo como se puede ver en la Figura 3-15B. En la Figura 3-16 se muestra la configuración final de la cámara para trabajar con el montaje de fotoelasticidad.

**Figura 3-15.** Imagen calibrada seleccionada y posterior ajuste del blanco



Fuente: Elaboracion propia.

**Figura 3-16.** Parámetros ajustados finales de la Cámara.

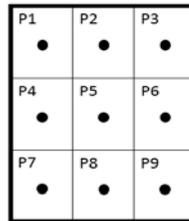


Fuente: Tomada del software de la cámara FlyCapture2 versión 2.7.3.8.

### 3.2.3 Medición del espectro emitido por la fuente de luz.

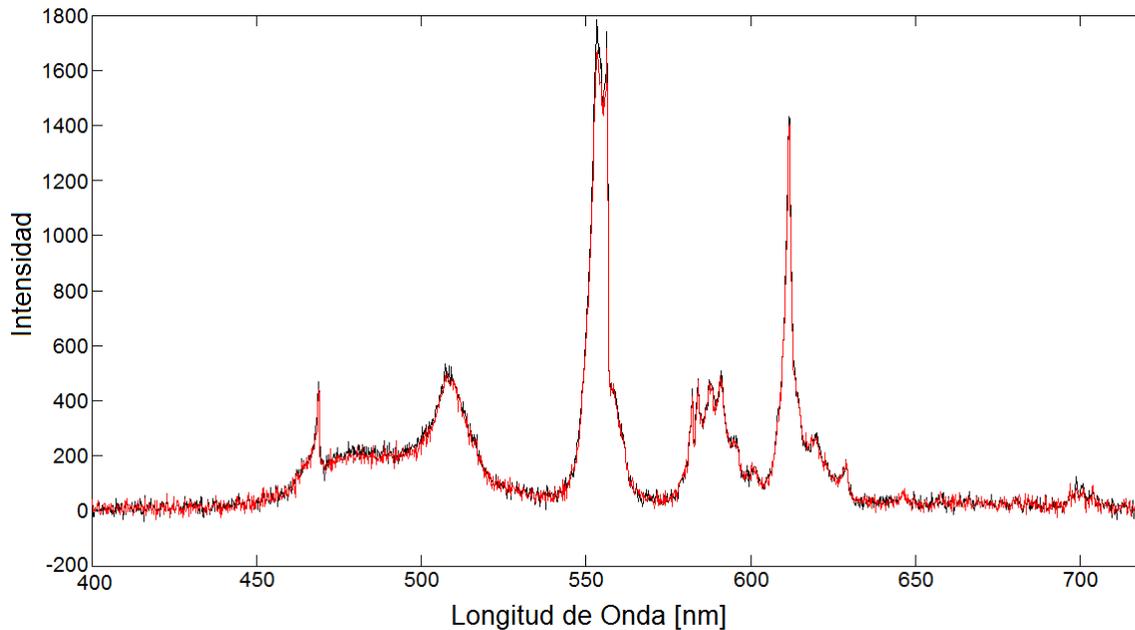
El experimento tiene como objetivo mostrar el espectro de la luz emitida por la pantalla LCD en nueve puntos ubicados como se ve en la Figura 3-17. Para esta medición es necesario un espectrómetro (ver Figura 3-10) y se ubica la fibra óptica lectora del espectro sobre el cristal de la fuente de luz sin elementos intermedios, los espectros medidos se pueden ver en la Figura 3-18 donde la luz de la pantalla tiene diferencias en intensidad pero las longitudes de onda son cercanas al espectro de la luz blanca.

**Figura 3-17.** Puntos de medición de la fuente de luz.



*Fuente: Elaboración Propia.*

**Figura 3-18.** Medición del espectro en los puntos P5 y P8.



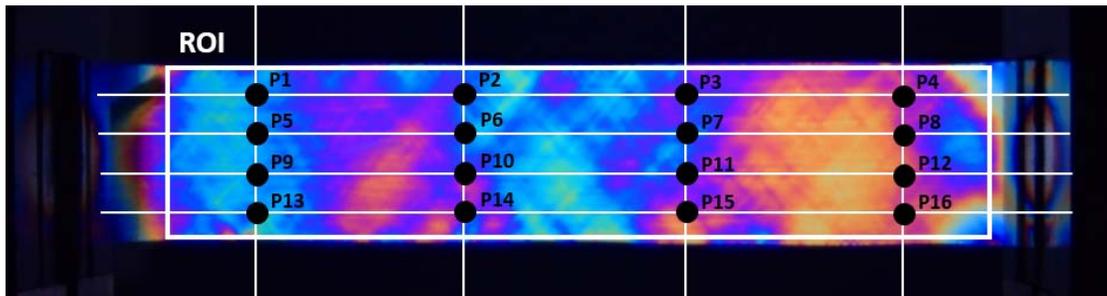
*Fuente: Elaboración Propia.*

### 3.2.4 Estabilidad de color

Este experimento de estabilidad de color busca mostrar la desviación estándar en la medición de intensidad en 16 puntos seleccionados de la imagen adquirida durante un tiempo determinado de  $t=5.0$  min.

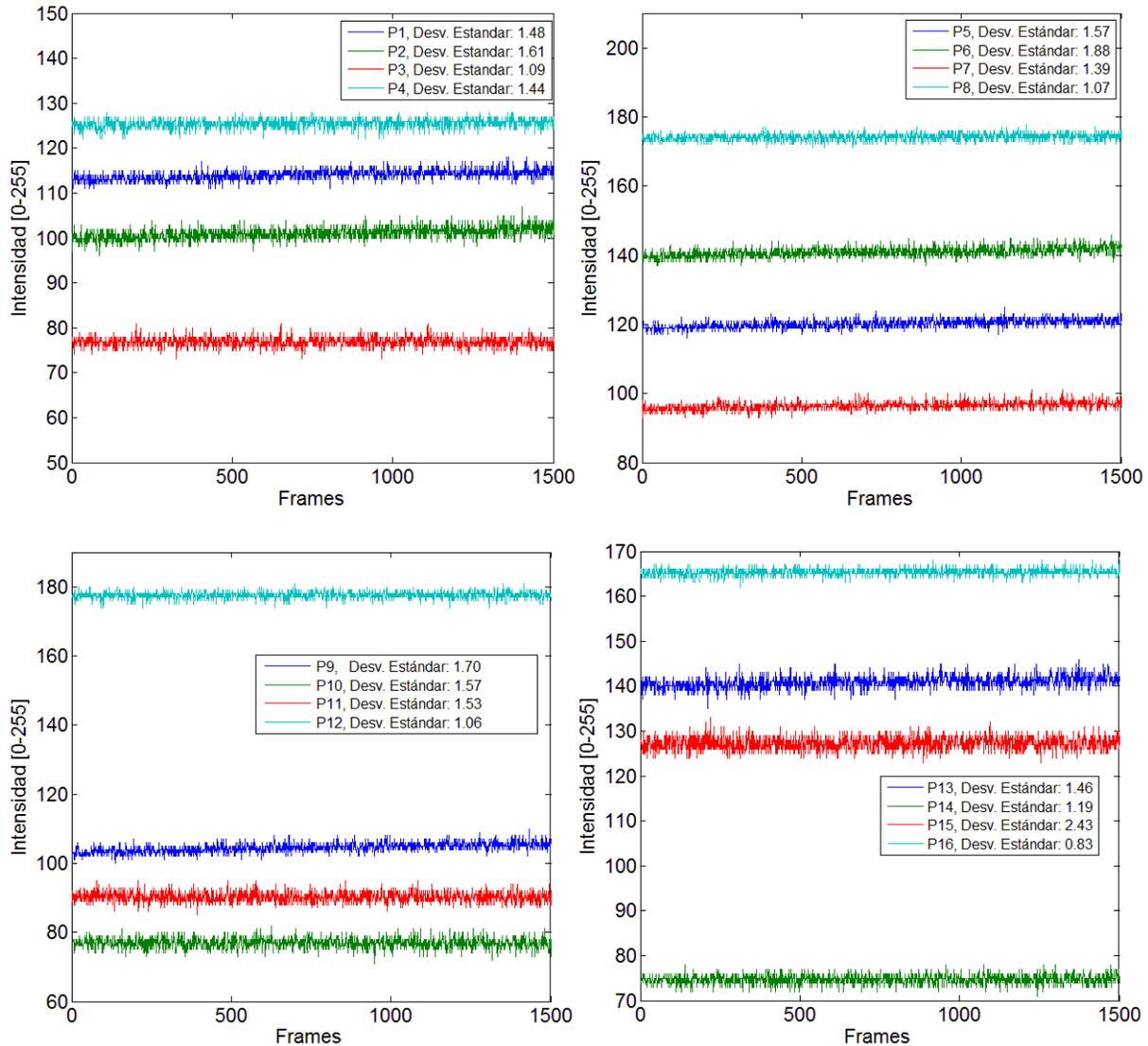
En este experimento se empleó el montaje de fotoelasticidad, una película deformada y tensionada evidenciando colores de interferencia como se ve en la Figura 3-19, se tomaron 16 pixeles (P1 al P16) con el fin de ver su evolución durante todo el video (1500 frames) en escala de grises y en la Figura 3-20 se puede ver la intensidad y la desviación estándar de cada punto; el promedio de los 16 puntos es 1.40 que corresponde al 0.54%.

**Figura 3-19.** Puntos de medición de análisis de estabilidad de color.



Fuente: *Elaboración Propia.*

**Figura 3-20.** Variación de intensidad de los puntos P1 al P16 en el tiempo.



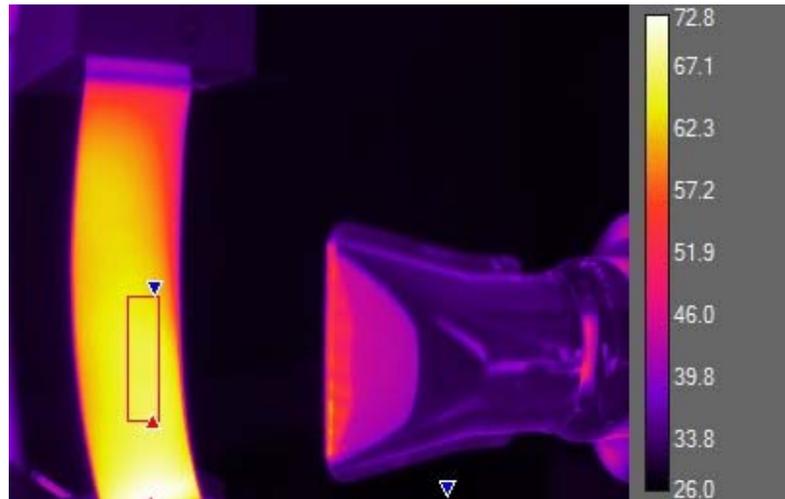
Fuente: *Elaboración Propia.*

### 3.2.5 Distribución de temperatura en la región de interés

En el proceso de termodeformación es necesario identificar cualitativamente la distribución de la temperatura en la película plástica antes de la deformación. El montaje se hace con una cámara termográfica marca Flir modelo "AX5 Assy" del laboratorio del ITM y a través

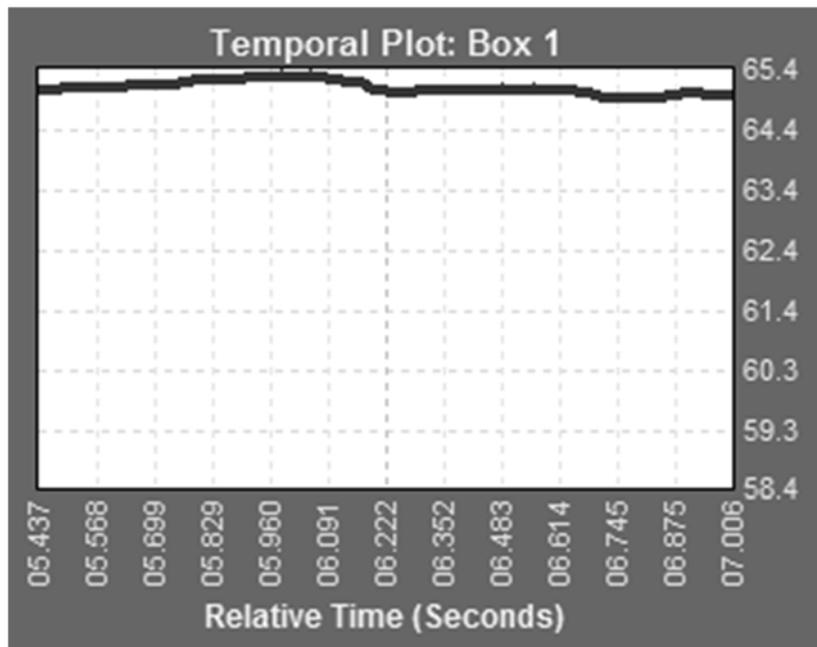
del recuadro ROI se verifica visualmente la homogeneidad de la temperatura (ver Figura 3-21); también a través de una gráfica que suministra el software se puede apreciar la curva temperatura [°C] vs tiempo [s] (ver Figura 3-22).

**Figura 3-21.** Región de interés ROI del calentamiento de la película.



Fuente: Tomada del Software FLIR ResearchIR Max Version 4.20.2.79.

**Figura 3-22.** Perfil de Temperatura del ROI en °C.



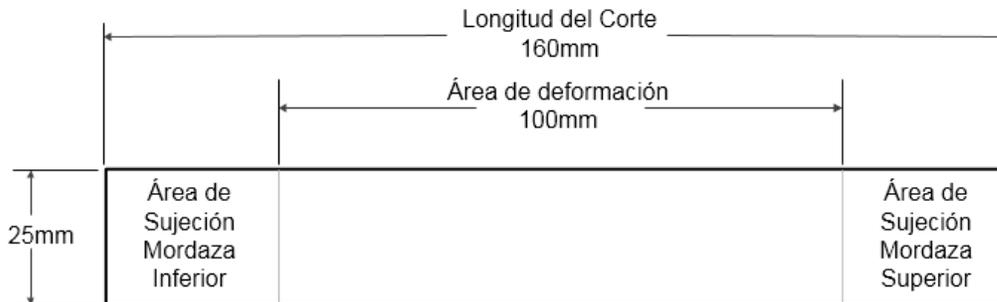
Fuente: Tomada del Software FLIR ResearchIR Max Version 4.20.2.79.

### 3.3 Adquisición de videos de fotoelasticidad

El montaje de fotoelasticidad (Figura 3-2 y Figura 3-3) cuenta con los equipos y elementos principales seleccionados en los ítems anteriores tales como la cámara RGB, lente, cámara termográfica, polarizador lineal, soplador de calor, máquina de tracción, fuente de luz polarizada y la película plástica multicapa (PPMC) debidamente preparada (ver Figura 3-23) según el estándar ASTM D-882 donde determina las medidas del corte de la PPMC y los parámetros de velocidad de la deformación.

Para este experimento las dimensiones de la PPMC son de ancho=25mm, largo=160mm y 130 $\mu$ m de espesor. También es importante hacer el corte longitudinalmente al sentido de las líneas de extrusión.

**Figura 3-23.** Dimensiones de la película probeta



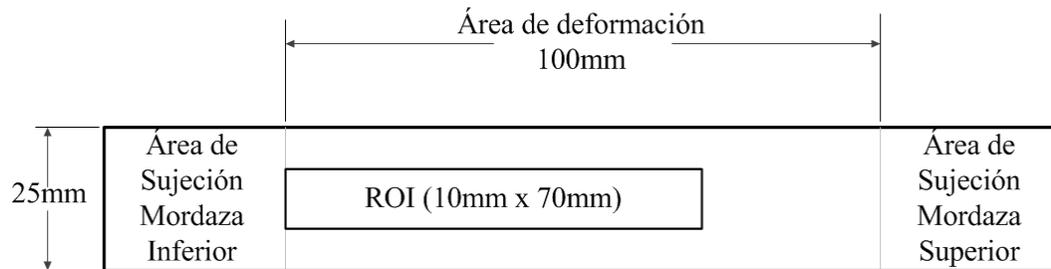
Fuente: *Elaboración Propia.*

La máquina de tracción se debe configurar en ruptura y elongación (*Break & Elong*) con longitud=100mm (*Length*), ancho=25mm (*Width*), espesor=0.130mm (*Thickness*), Velocidad=500mm/min (*Speed*). Luego de tener el montaje y las probetas, se procede a sujetar la PPMC en las mordazas de la máquina de tracción, se enciende la fuente de luz (pantalla LCD), el polarizador se gira hasta tener anulación de la luz ( $\pi/2$  respecto a la dirección de polarización de la pantalla) y se habilitan las aplicaciones tanto de la cámara en modo video (30fps) como el de la máquina de tracción para la toma de datos de fuerza vs deformación.

Para deformación a temperatura ambiente se procede a iniciar la grabación del video e iniciar el experimento presionando el botón “test” de la máquina. En el caso de deformación con carga térmica se enciende previamente al inicio el soplador de calor y a través de la cámara termográfica se verifica que la temperatura deseada en la PPMC sea homogénea en el área de interés, durante el experimento el soplador de calor debe aplicar el flujo de aire caliente sobre el área del recuadro y este se realiza de manera manual.

Se adquieren 10 videos de deformación a temperatura ambiente  $T=20^{\circ}\text{C}$  y 10 videos con carga térmica a  $T=60^{\circ}\text{C}$ , estas tienen una duración de aproximadamente 40 segundos a una tasa de 30 fps (*frames per second*), posterior a la adquisición, las imágenes son procesadas realizándole un recorte como se ve en la Figura 3-24 (dimensiones del recorte 1920x1013 pixeles); el área de interés ROI ha sido ubicado en cercanía de la mordaza fija ya que en esta área se presenta mayor dinámica de la franjas de color, además en los procesos industriales de termoformado, las películas plásticas son precalentadas y sujetadas por prensas previamente a la deformación.

**Figura 3-24.** Área de recorte de la imagen adquirida.



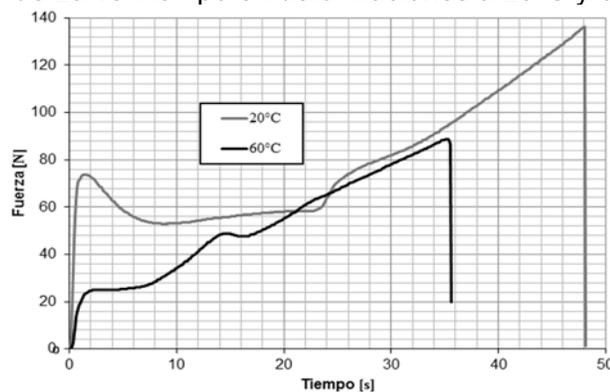
Fuente: *Elaboración Propia.*



## 4. Resultados

El primer resultado obtenido del sistema de fotoelasticidad digital para deformación con carga térmica son las curvas de la Fuerza Aplicada vs Deformación (curva arrojada por la máquina de tracción) de cada escenario térmico, por lo tanto tenemos dos curvas, una con deformación de la PPMC a temperatura ambiente ( $20^{\circ}\text{C}$ ) y otra con adición de calor en la ROI a  $T=60^{\circ}\text{C}$ . En la Figura 4-1 se muestra la superposición de las dos curvas transformadas linealmente en el eje x para ser representadas en el tiempo y no en la deformación, la razón de la representación de la fuerza en el tiempo es para relacionar la fuerza ejercida a la PPMC a cada frame del video con el fin de identificar en experimentos siguientes la posición en el tiempo de los cambios de color. La transformación lineal del eje x se lleva a cabo debido a que la máquina de tracción garantiza un desplazamiento constante y por esta razón se puede asumir que cada frame tiene la misma cantidad de desplazamiento. Por lo tanto se realiza identificando el número de frames transcurridos en el video desde el instante de inicio de la deformación hasta el instante de ruptura de la película plástica y conociendo la tasa de muestreo (30 frames/segundo) se establece sobre el eje x la duración total de la deformación. En la Tabla 2 se muestran las imágenes más representativas del video tanto para  $T=20^{\circ}\text{C}$  como  $T=60^{\circ}\text{C}$ .

**Figura 4-1.** Curva de Fuerza vs Tiempo en deformaciones a  $20^{\circ}\text{C}$  y  $60^{\circ}\text{C}$



Fuente: *Elaboración Propia.*

**Tabla 2.** Imágenes de fotoelasticidad representativas de la deformación a  $T=20^{\circ}\text{C}$  y  $60^{\circ}\text{C}$

t [s]	Imagen ROI ( $T=20^{\circ}\text{C}$ )	Imagen ROI ( $T=60^{\circ}\text{C}$ )
0		
0.16		
0.33		
0.5		
0.66		
0.83		
1.0		
1.16		
1.33		
1.5		
1.66		
1.83		
2.0		
2.16		
2.5		
2.83		
3.16		
3.33		
3.83		
4.33		
4.83		
5.33		
6.66		
8.33		
10.0		
11.66		
13.33		
16.66		
20.0		
23.33		
26.66		
30.0		

Fuente: Elaboración Propia.

### 4.1.1 Análisis de resultados

Las películas plásticas multicapa sometidas a termodeformación generan esfuerzos mecánicos que alteran las propiedades ópticas y mecánicas del material. El experimento arroja varias observaciones tales como: a medida que el material es deformado este va aumentando su resistencia a la tracción debido a la reorientación de las cadenas poliméricas; al aplicar carga térmica a la PPMC esta favorece la deformación en la ROI e impide que otras zonas se deformen, por lo tanto en la ROI se presenta la ruptura de la PPMC ya que es el área calentada.

Los cambios de orden son más rápidos cuando se está aplicando carga térmica y también es más homogénea, esto corresponde a que en la zona el calor lleva al material polimérico a un punto cercano de fusión; observando las curvas de la PPMC a 20°C requiere vencer la región elástica (ver Figura 2-3) para empezar a tener una deformación viscoelástica, en cambio la PPMC con carga térmica no tiene esta rampa de elasticidad y la deformación empieza de  $t_0$ .

### 4.1.2 Conclusión

La aplicación de calor genera cambios en la manera en como la película plástica se deforma y con menor aplicación de fuerza, a modo de hipótesis el tiempo de ruptura se reduce debido a la concentración de calor en la región de interés que permite mayor deformación y por ende la aceleración en la reducción del espesor.

La deformación con carga térmica disminuye la fuerza requerida para vencer la zona elástica en la cual para  $T=60^{\circ}\text{C}$  se reduce un 67% respecto al caso en que no se aplica temperatura, por tal razón el proceso de termodeformación emplea el vacío para dar forma en la cavidad del molde.

## 4.2 Correlación digital de imágenes

La colección de imágenes pre-procesadas y separadas por cada canal (R,G y B) se emplea para realizar el respectivo análisis bajo la métrica de similitud por la técnica de correlación digital de imágenes, donde se correlaciona la primera imagen contra cada una (cada *frame*) de la colección usando la distancia Euclídea, este análisis nos permite describir el grado de dependencia lineal que existe entre una imagen y otra. En la Figura 4-2 se pueden apreciar los procesos realizados en el experimento, para llegar al análisis de variación del comportamiento temporal de las imágenes adquiridas por fotoelasticidad en proceso de termodeformación a temperaturas distintas.

**Figura 4-2.** Procesos del experimento



Fuente: Tomada del poster de Meléndez, Briñez, Branch, & Restrepo, (2015).

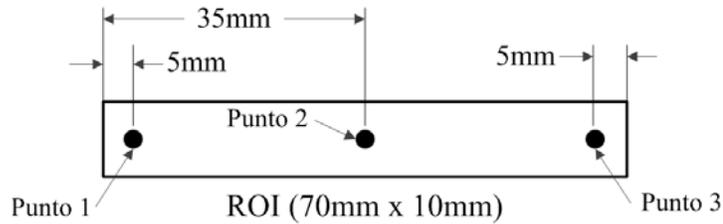
### 4.2.1 Evolución de intensidad

El análisis de evolución de intensidad en un punto de la imagen, muestra el comportamiento en el tiempo de la intensidad por cada canal del espacio de color RGB y además revela los cambios de orden que se presentaron en la deformación. Con las

imágenes adquiridas y pre-procesadas se seleccionaron tres puntos en el interior de la región de interés (ROI) como se puede apreciar en la Figura 4-3.

La selección de los puntos obedece a que con estos se pueda comparar cualitativamente la dinámica de la evolución de intensidad de un pixel y establecer diferencias entre la deformación con y sin carga térmica referenciada bajo su posición en la ROI.

**Figura 4-3.** Ubicación de tres puntos de medición de evolución de intensidad en el ROI



Fuente: *Elaboración propia.*

### 4.2.2 Resultados y discusión

En la Figura 4-4, Figura 4-5 y Figura 4-6 se muestran los resultados de la correlación para la secuencia de imágenes de la Tabla 2 tanto a  $T=20^{\circ}\text{C}$  como a  $T=60^{\circ}\text{C}$  por cada canal R, G y B respectivamente. Esta correlación digital de imágenes es basada en la distancia euclídea mostrando diferencias en el valor de la correlación y cambios de orden en cada una de los canales del espacio de color RGB. Para este análisis de correlación es necesario observar la Figura 4-1 donde se muestra la superposición de las dos curvas de Fuerza vs Tiempo con y sin carga térmica, con el fin de poder tener una base de referencia común con las gráficas de correlación y evolución de intensidad. Al observar las curvas se puede apreciar la diferencia del comportamiento con condiciones de temperatura diferentes. Una de las primeras apreciaciones es que en la zona inicial entre 0.0s y 2.0s, la fuerza aplicada a temperatura ambiente ( $20^{\circ}\text{C}$ ) fue de 73.85N para vencer la zona elástica de la PPMC y para  $60^{\circ}\text{C}$  solo se requirió 24.64N, el cual corresponde al 33.36% de 73.85N; en el análisis de las curvas se empleó el área bajo la curva como métrica de comparación entre estas:

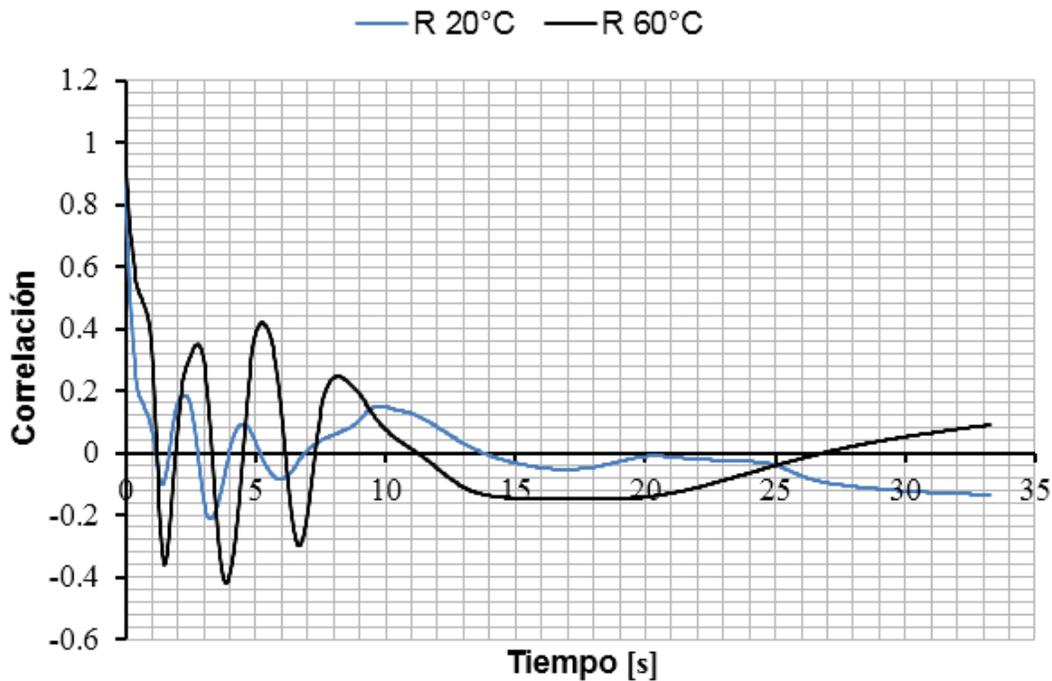
Rango eje x = [0.0....30.0s]

$$A_{bc\_20^{\circ}\text{C}} = 1904 \text{ [N}\cdot\text{s]} \tag{4-1}$$

$$A_{bc\_60^{\circ}\text{C}} = 1382 \text{ [N}\cdot\text{s]} \tag{4-2}$$

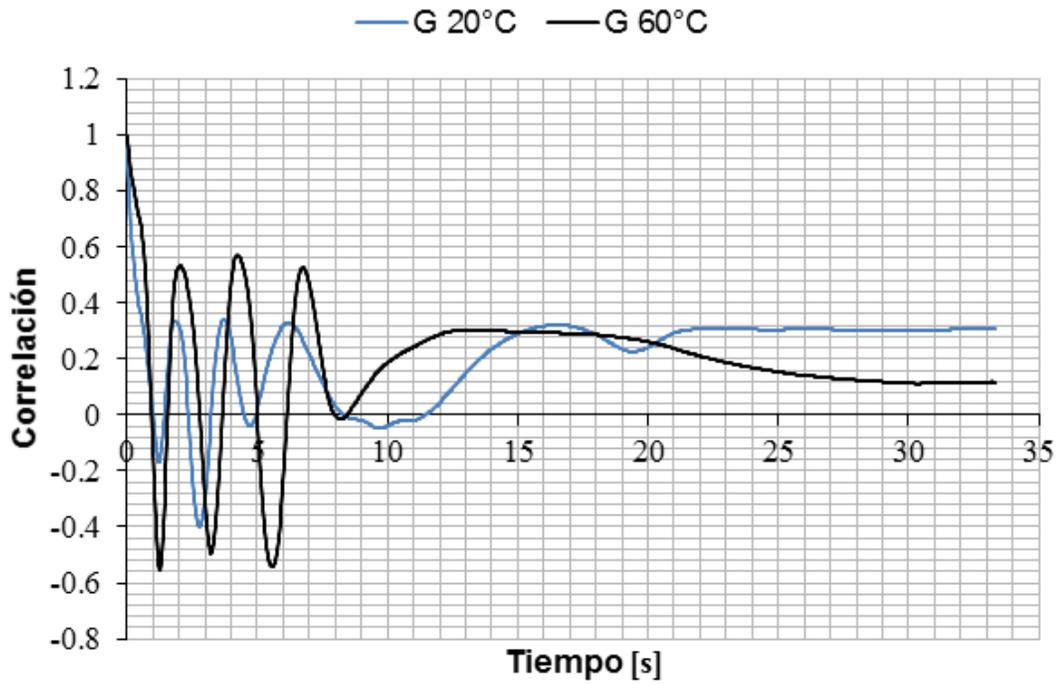
El área bajo la curva tiene unidades de momentum [ $N \cdot s$  ó  $Kg \cdot m/s$ ] el cual nos indica la cantidad de movimiento o impulso neto que se requiere para deformar la película y de acuerdo a esto se puede afirmar que en la deformación a  $60^{\circ}C$  se requiere un 27.4% menos de momento lineal para deformar la PPMC. También se puede ver en la gráfica de la Figura 4-1 que al final de la zona viscoelástica en el punto de ruptura de la PPMC a  $T=60^{\circ}C$  se produce en menor tiempo (diferencia de 12.47s) en comparación a la deformación a  $T=20^{\circ}C$ . Este comportamiento puede ser debido al calentamiento de la película que se efectuó sobre un área específica el cual no permite que en otras áreas de la PPMC se deforme, dejando así solo a la región de interés toda la deformación y así vencer el material en menor tiempo. En la secuencia de imágenes adquiridas mostradas en la Tabla 2 se observan diferencias en el comportamiento de las franjas de color, donde en la deformación con carga térmica ( $T=60^{\circ}C$ ) las franjas de color tienen cambios rápidos y homogéneos. Los valores de correlación tienen fluctuaciones que demuestran que desde  $t=0s$  hasta  $t=7.5s$  se generan los mayores cambios en las imágenes, lo cual corrobora lo analizado con las imágenes de la Tabla 2 donde se aprecian los cambios en las franjas de color.

**Figura 4-4.** Gráfica de correlación del canal rojo para deformación a  $20^{\circ}C$  y  $60^{\circ}C$



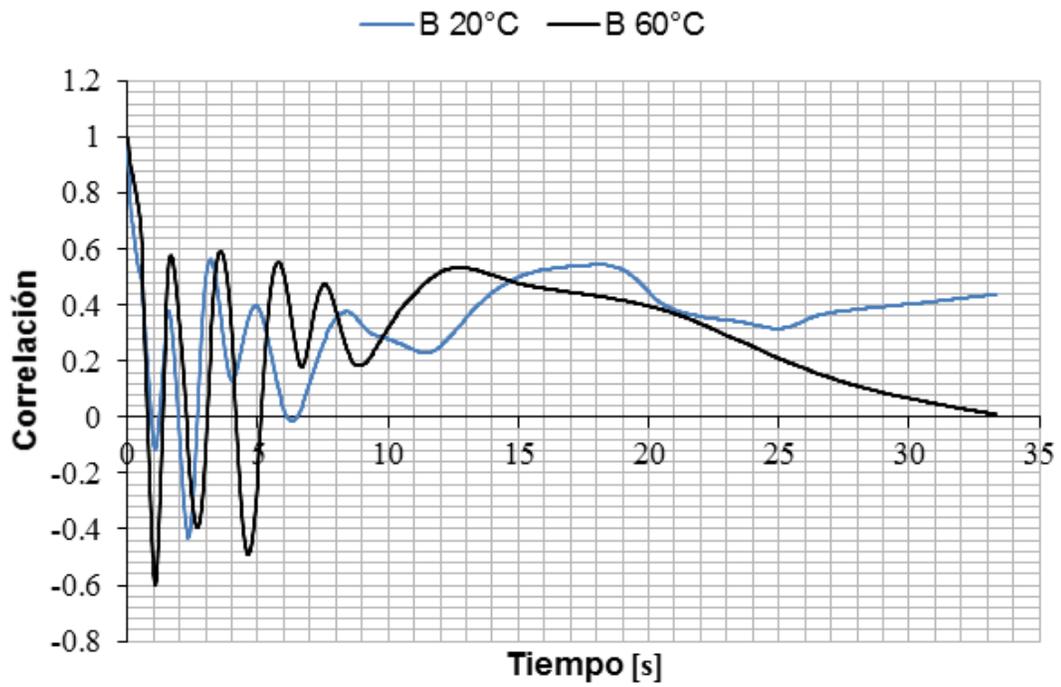
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 4-5.** Gráfica de correlación del canal verde para deformación a 20°C y 60°C



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 4-6.** Gráfica de correlación del canal azul para deformación a 20°C y 60°C



Fuente: Elaboración propia.

Una manera de buscar diferencias entre las deformaciones con y sin carga térmica es usar la métrica del área bajo la curva que nos indica que tanto cambió las imágenes del video comparado con la primera imagen (primer frame) en donde un valor máximo de área sería 333 [Coef.corr•s] (1000 frames idénticas). Un área absoluta cercana a cero indica baja correlación, ósea que las imágenes cambiaron considerablemente en el tiempo, y un valor cercano a 333 representa una alta correlación indicando que las imágenes tuvieron bajos cambios, ahora un valor negativo del área determina que hubo más correlaciones negativas que positivas. En la Figura 4-4, Figura 4-5 y Figura 4-6 se compara cada una de las gráficas dando como resultado la Tabla 3. En esta se observa que la deformación a  $T=60^{\circ}\text{C}$  está por debajo a la deformación a  $T=20^{\circ}\text{C}$ , indicando que con temperatura la curva de correlación convergen más rápido a valores cercanos a cero donde los cambios de intensidad son bajos y se evidencia en las imágenes a partir de  $t=9.0\text{s}$  donde se presentan colores homogéneos y el patrón de franjas de color se desplaza lentamente; estos primeros 9.0s de la deformación exponen cambios de orden de manera rápida y en las imágenes siguientes los cambios son lentos y se puede ver en la Tabla 2 a partir de  $t>8.33\text{s}$ . También si observamos la Figura 4-1 sobre la curva a  $T=60^{\circ}\text{C}$  entre  $t=14.0\text{s}$  y  $t=37.0\text{s}$  la fuerza muestra un comportamiento lineal lo cual indica que se está deformando la PPMC y presentando mayor oposición a la fuerza de tensión, sí observamos las tres graficas de correlación de las Figura 4-4, Figura 4-5 y Figura 4-6 para la correlación a  $T=60^{\circ}\text{C}$  entre el mismo rango de tiempo el coeficiente de correlación también tiene un comportamiento con poca variación en la intensidad.

**Tabla 3.** Comparativo de área bajo la curva

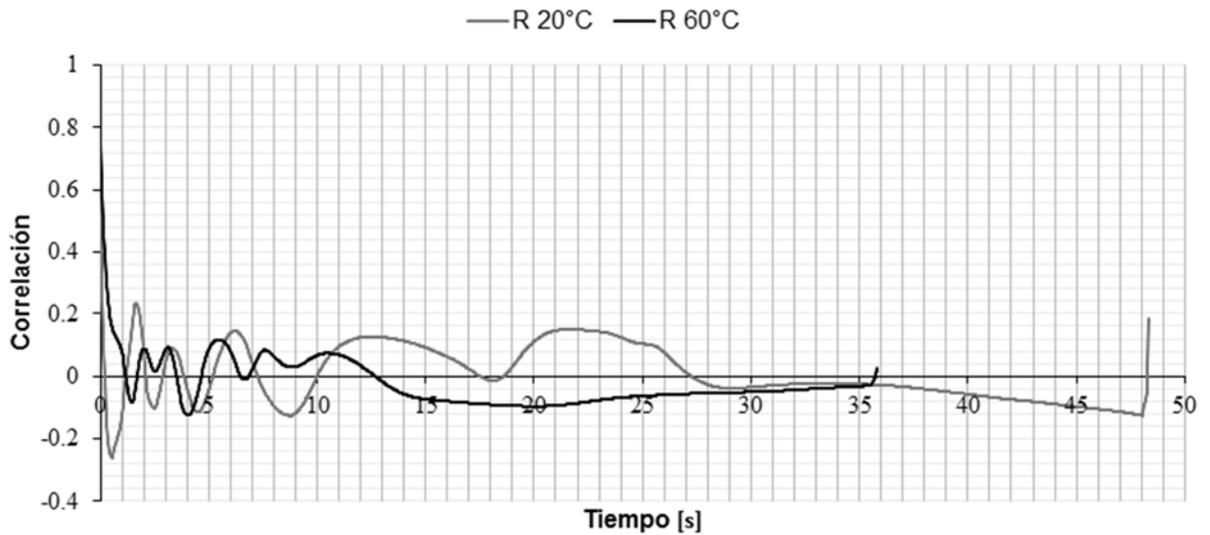
Area Bajo la Curva		
	<i>Curva (20°C)</i>	<i>Curva (60°C)</i>
<b>A<sub>R</sub></b>	-13.836	-2.4336
<b>A<sub>G</sub></b>	214.49	186.93
<b>A<sub>B</sub></b>	349.71	271.92

*Fuente: Elaboración propia.*

El anterior análisis de correlación digital de imágenes se hizo en un rango de tiempo definido con el fin de tener una base común de comparación entre áreas bajo la curva. En las Figura 4-7, Figura 4-8 y Figura 4-9 se muestran las correlaciones completas de la deformación hasta la ruptura, en estas se puede ver que previamente a la ruptura de la

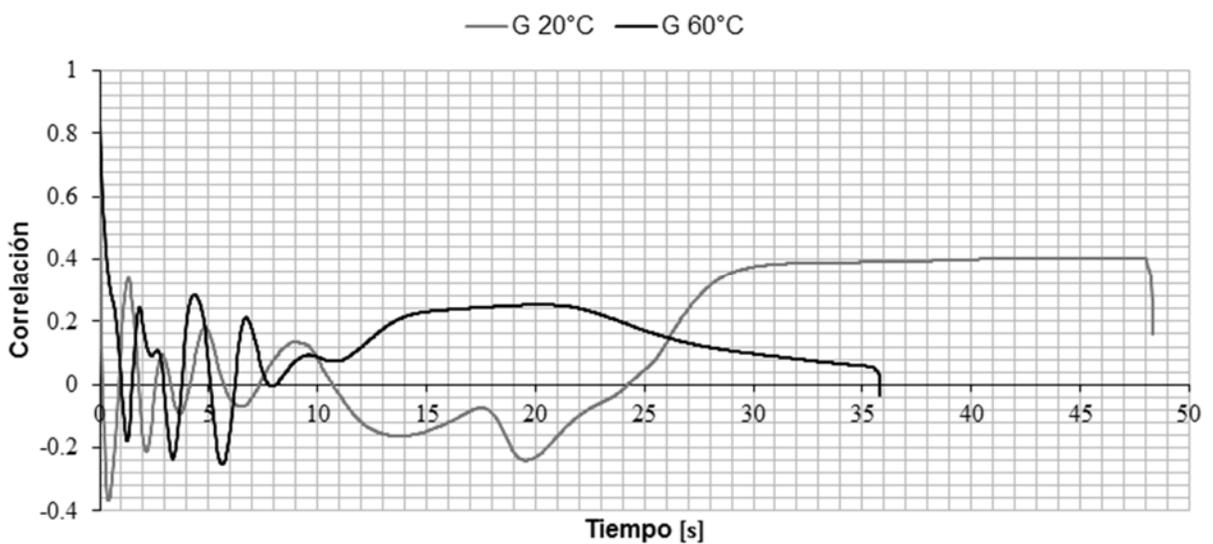
PPMC el coeficiente de correlación tiene un comportamiento convergente al eje del tiempo; este comportamiento cercano a cero del coeficiente de correlación lineal se evidencia en que las imágenes muestran un patrón de franjas de color que se desplazan de manera lenta y homogénea con bajos cambios de intensidad de color.

**Figura 4-7.** Gráfica de correlación del canal rojo en video completo para deformación a 20°C y 60°C



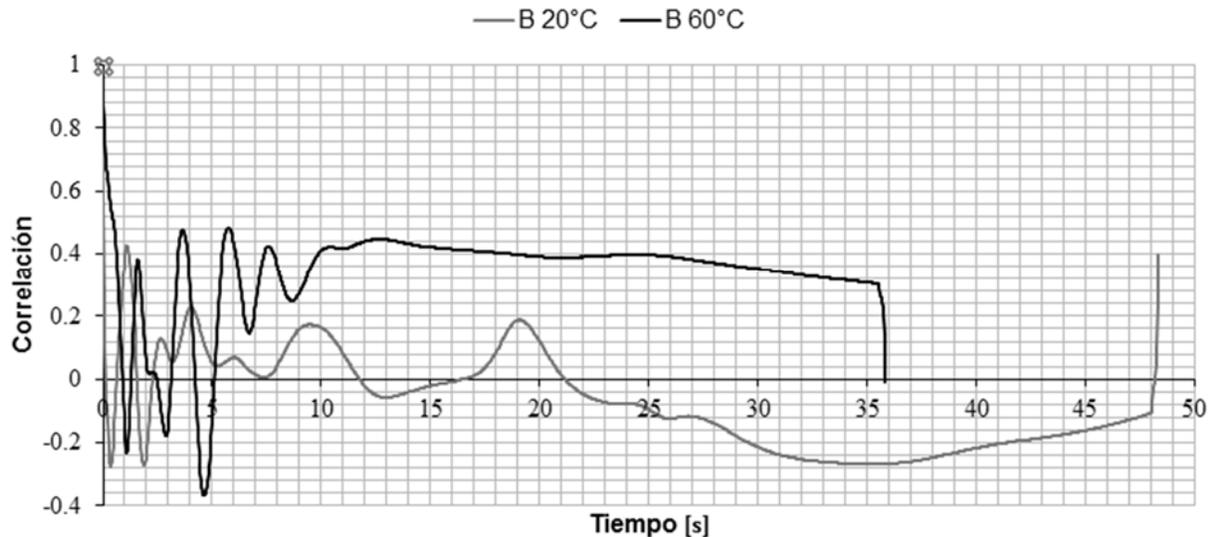
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 4-8.** Gráfica de correlación del canal verde en video completo para deformación a 20°C y 60°C



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 4-9.** Gráfica de correlación del canal azul en video completo para deformación a 20°C y 60°C

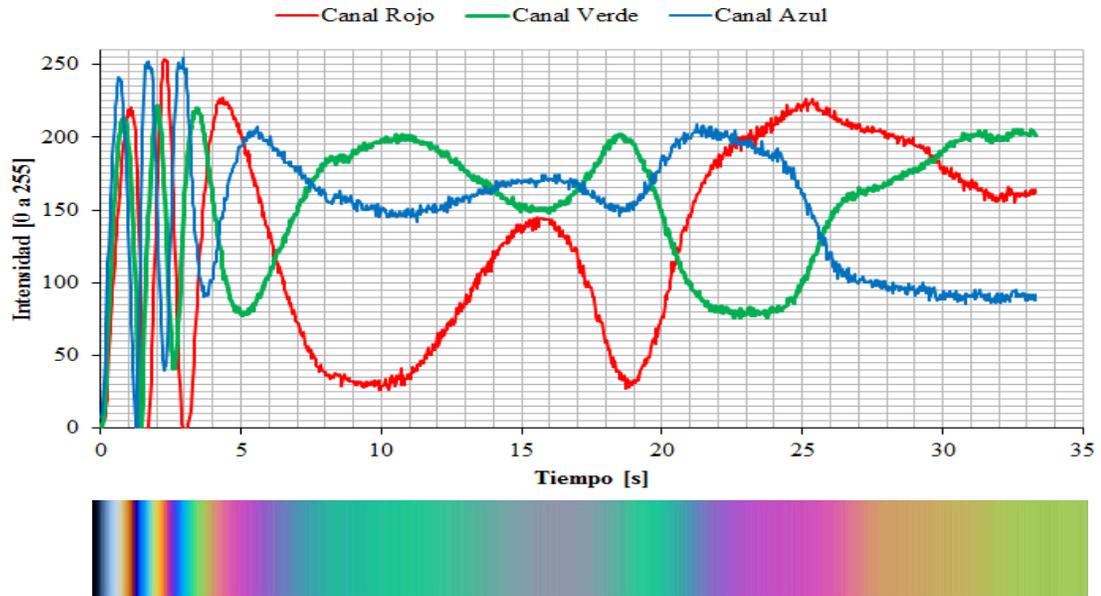


Fuente: Elaboración propia.

Al observar las gráficas de las Figura 4-7, Figura 4-8 y Figura 4-9 se puede ver un comportamiento similar entre las dos curvas, el cual se podría decir que la temperatura acelera el proceso ahorrándose 12.0s en la deformación y se puede apreciar cuando en las curvas se tornan en una línea horizontal, y en las tres graficas la curva de correlación a  $T=60^{\circ}\text{C}$  la línea horizontal inicia en aproximadamente entre  $t=12.0\text{s}$  y  $t=16\text{s}$ , mientras que para la curva a  $T=20^{\circ}\text{C}$  inicia a partir de  $t=28.0\text{s}$ .

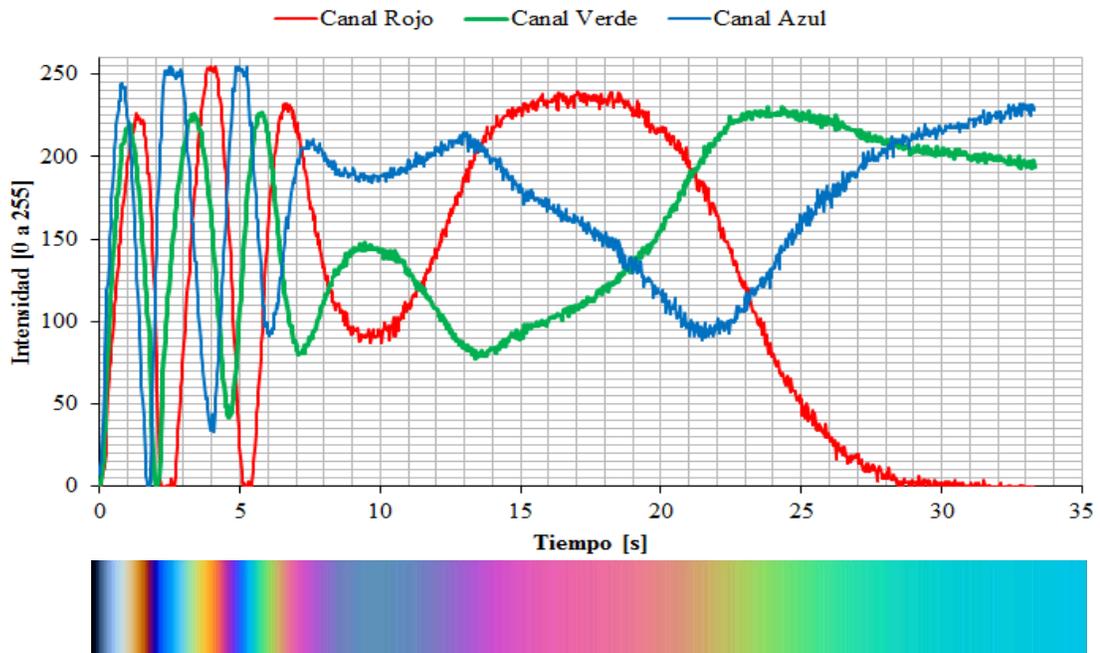
Para el análisis de la evolución de intensidad en los puntos seleccionados (ver Figura 4-3) se muestran tres pares de imágenes que corresponde a cada punto (un pixel). Para el punto No.1 se tiene las gráficas de la Figura 4-10 y Figura 4-11 a  $T=20^{\circ}\text{C}$  y  $T=60^{\circ}\text{C}$  correspondientemente, al observarlas se puede decir que en este punto no hay convergencia y presenta cuatro cambios de orden durante la deformación, esto se puede deber a que el punto #1 está muy cercano a la mordaza donde la PPMC esta sujeta fijamente y la deformación es constante y se puede ver en las imágenes de la Tabla 2. Para el punto No.2 (ver Figura 4-12 y Figura 4-13) que está ubicado en el centro de la ROI, el comportamiento de los canales azul y verde convergen a una intensidad cercana a los 170 (rango de intensidad de a imagen es de 0 a 255) en los dos escenarios para el mismo punto, con la diferencia de que a  $T=60^{\circ}\text{C}$  la convergencia se produce 2.5s antes. En el punto No.3 (ver Figura 4-14 y Figura 4-15) que es el más alejado de la mordaza muestra un comportamiento similar al del punto No.2.

**Figura 4-10.** Gráfica de evolución de intensidad en el punto 1 del ROI a T=20°C

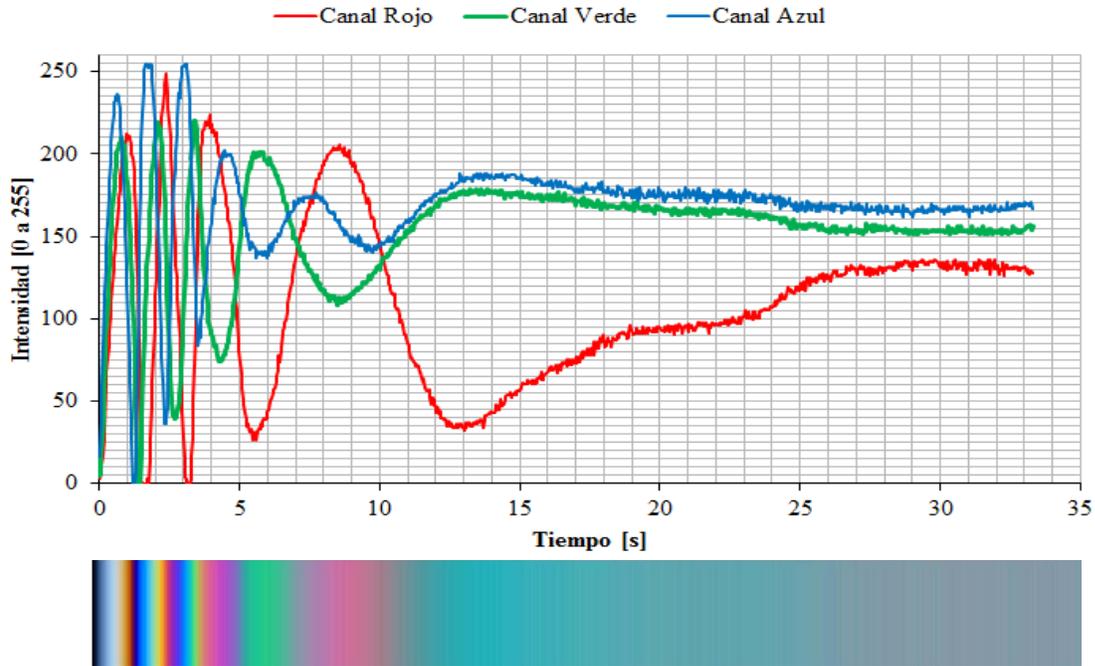
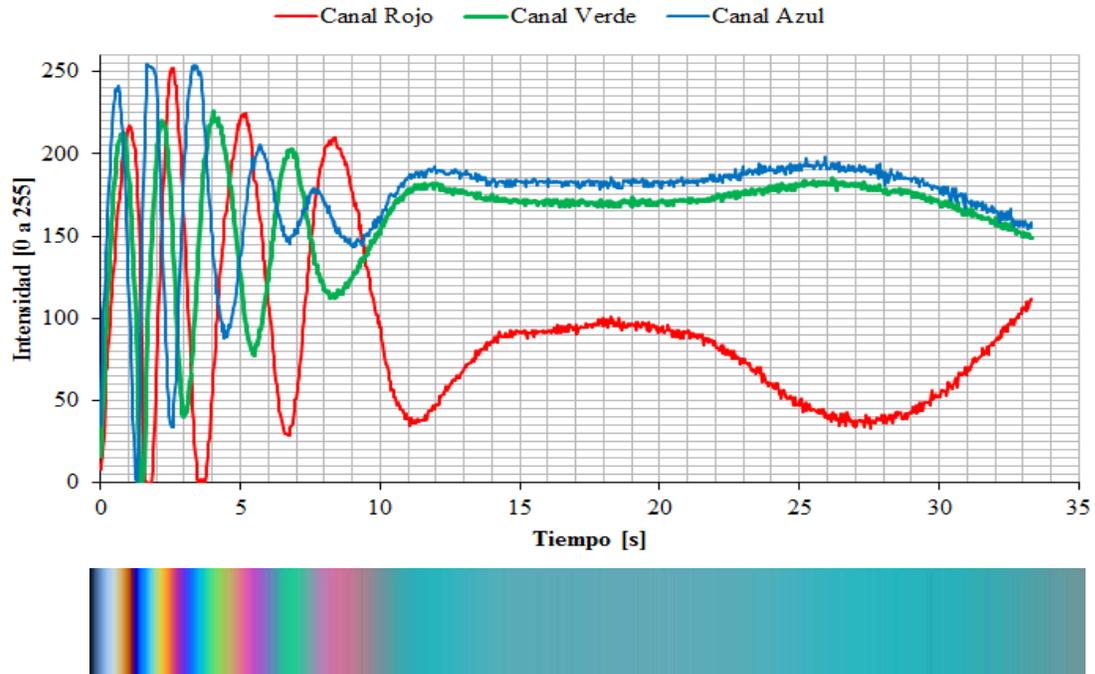


Fuente: Elaboración propia.

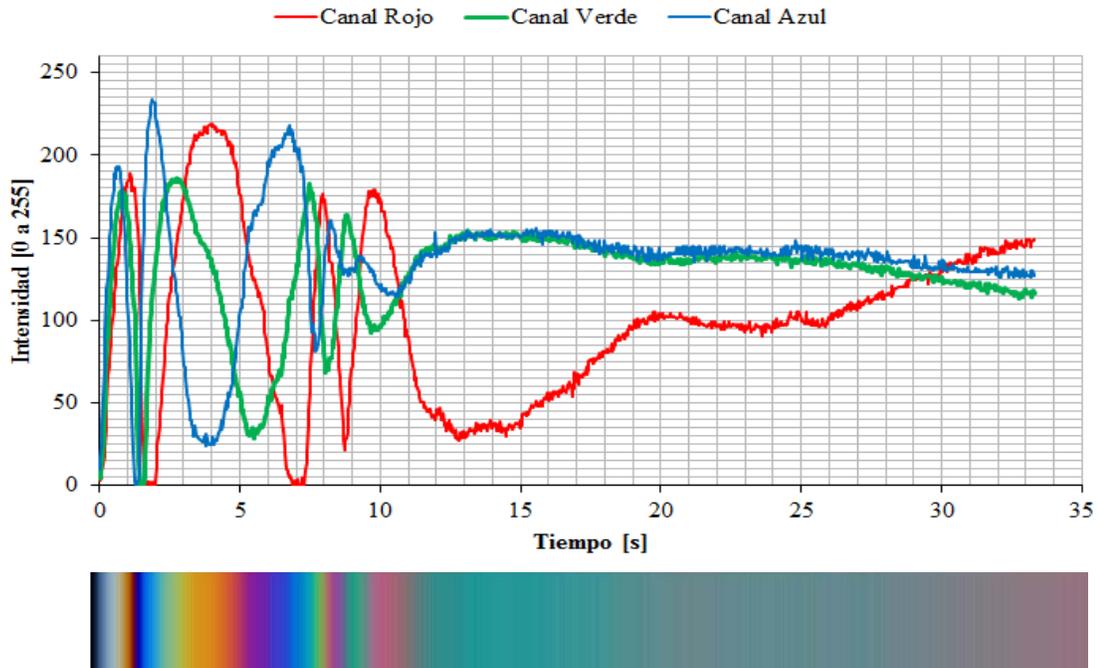
**Figura 4-11.** Gráfica de evolución de intensidad en el punto 1 del ROI a T=60°C



Fuente: Elaboración propia.

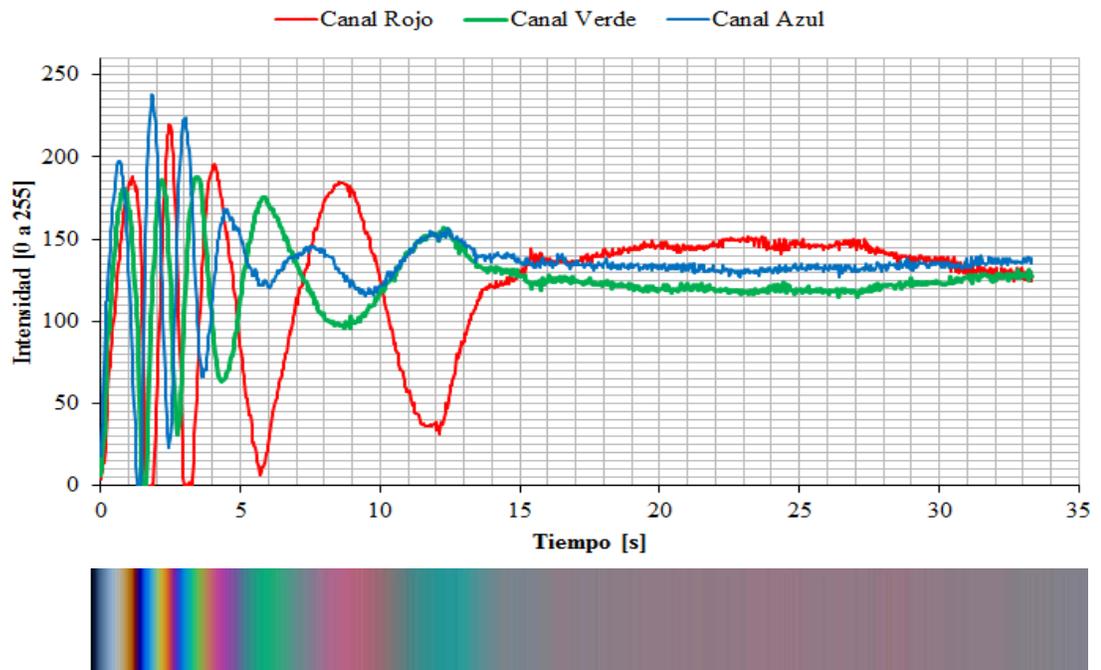
**Figura 4-12.** Gráfica de evolución de intensidad en el punto 2 del ROI a  $T=20^{\circ}\text{C}$ **Figura 4-13.** Gráfica de evolución de intensidad en el punto 2 del ROI a  $T=60^{\circ}\text{C}$ 

**Figura 4-14.** Gráfica de evolución de intensidad en el punto 3 del ROI a T=20°C



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 4-15.** Gráfica de evolución de intensidad en el punto 3 del ROI a T=60°C



Fuente: Elaboración propia.

### 4.2.3 Conclusión

La evaluación sobre la aplicación de carga térmica al proceso de deformación de la película plástica multicapa bajo el comportamiento temporal de fotoelasticidad se encontró que el calor agregado a la PPMC fue necesario usar menos energía mecánica para su deformación, también su comportamiento mecánico (Fuerza vs tiempo) tiene tendencia a formar una línea recta creciente debido a que el calor reduce considerablemente la zona elástica. Las correlaciones de imágenes nos mostraron que con carga térmica el coeficiente de similitud fluctúa durante los primeros cuatro cambios de orden y luego converge a un valor en menor tiempo en comparación a la deformación sin carga térmica. El análisis de evolución de intensidades se evidenció que en el comportamiento de los esfuerzos mecánicos es diferente en cada zona de la película plástica. Se puede decir que para franjas de color de mayor orden se tiene que el coeficiente de correlación es bajo en la zona central de la ROI.

### 4.3 Generación imagen sintética

El uso de una imagen sintética empleada como una LUT (*Look-Up Table*) se enmarca dentro de las técnicas de fotoelasticidad digital y en ella se encuentra la fotoelasticidad de tres franjas (*three fringe photoelasticity-TFP*) y/o fotoelasticidad RGB (*RGB photoelasticity*) que involucra el uso de imágenes a color de fotoelasticidad adquirida con una fuente de luz blanca con el fin de estimar del orden y para ello se requiere la adquisición simultánea de múltiples imágenes con retardo de fase de  $\pi/4$  (Swain, Thomas, Philip, & Pillai, 2015).

El orden de la franja en algún punto del modelo foto-elástico es obtenido mediante la comparación de las componentes de color de un punto con los de una tabla de calibración (color vs retardo de fase). El método más directo es calcular el error mínimo cuadrado ' $e$ ' para cada fila  $i$  en la tabla de calibración utilizando la fórmula de diferencia de color y la identidad del orden de la franja que corresponde al valor mínimo del error ' $e$ ' usando la siguiente ecuación de diferencia de color. (Ramesh & Ramakrishnan, 2011)

$$e_i = \sqrt{(R - R_i)^2 + (G - G_i)^2 + (B - B_i)^2} \quad (4-3)$$

Para llevar a cabo la comparación es necesario disponer de una carta (tabla) de calibración, por lo tanto se requiere generar una carta a partir de una imagen sintética el cual tiene como objetivo ser una imagen de colores de interferencia que está asociada directamente con el retardo de fase y con esta se pueda comparar con los colores que poseen las imágenes reales adquiridas y hacer una demodulación que conlleve a generar una imagen real transformadas en sintético-real y poder hallar el orden de los colores.

Sorensen, (2013) propone una revisión de la carta original de colores de interferencia de Michel-Lévy donde es fácil ajustar a diferentes tipos de óptica e iluminación, también el mejorado entendimiento de los colores de interferencia abre a nuevas posibilidades en el análisis de imágenes en imágenes por transmisión de luz que involucran colores de interferencia.

Para la generación de la imagen sintética se usa la ecuación de la luz de interferencia y se produce el espectro de colores transformado a la matriz de visión humana y dispositivos de color como las pantallas de computadora.

Los colores de interferencia son calculados por la relación entre la longitud de onda y la luz transmitida, donde “ $\lambda$ ” es la longitud de onda en *nm* (nanómetros) y “ $I$ ” el grado de transmisión. “ $\alpha$ ” es el ángulo entre la dirección de la vibración del polarizador y el analizador,  $\beta$  es el ángulo entre la dirección privilegiada del polarizador y la más cercana dirección privilegiada del espécimen y “ $\delta$ ” es el retardo.

$$I = \cos^2 \alpha - \sin^2(\beta - \alpha) \sin^2(\beta) \sin^2\left(\frac{180^\circ \delta}{\lambda}\right) \quad (4-4)$$

Cuando el ángulo entre el analizador y el polarizador  $\alpha=90^\circ$ , la ecuación 4-4 se reduce a:

$$I(\delta, \lambda) = \sin^2\left(\frac{180^\circ \delta}{\lambda}\right) \quad (4-5)$$

Aplicando a la ecuación anterior la longitud de onda del espectro visible (360-800nm) y los posibles retardos son expresados en una matriz así:

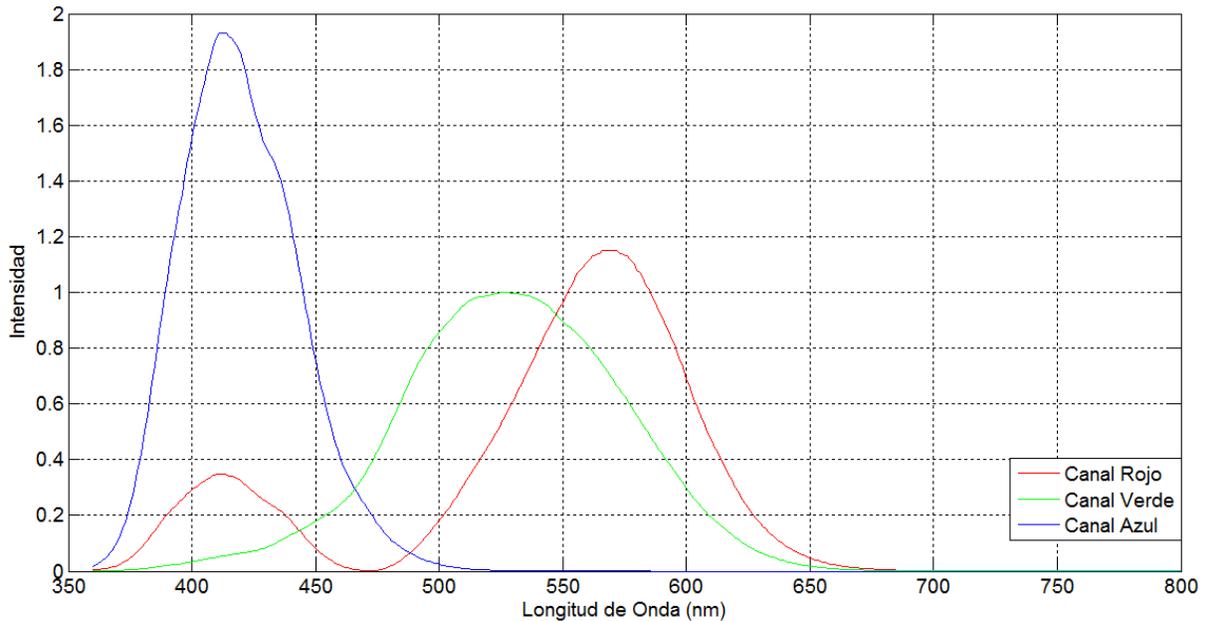
$$I_\lambda = \begin{bmatrix} L(\delta_1, 360 \text{ nm}) & \dots & L(\delta_n, 360 \text{ nm}) \\ \dots & \dots & \dots \\ L(\delta_1, 800 \text{ nm}) & \dots & L(\delta_n, 800 \text{ nm}) \end{bmatrix} \quad (4-6)$$

Para que esta matriz de espectro de color pueda ser visualizado por el ojo humano es necesario recalcular el espectro usando una función de comparación de color CIE1931 (ver Figura 4-16) así:

$$I_{XYZ} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{r}_\lambda \\ \vec{g}_\lambda \\ \vec{b}_\lambda \end{bmatrix} I_\lambda \quad (4-7)$$

Donde  $I_\lambda$  es la matriz (dimensión matriz=441x3000) de espectro de colores para todas los retardos,  $\vec{r}_\lambda$ ,  $\vec{g}_\lambda$  y  $\vec{b}_\lambda$  (dimensión vector=441) son las funciones de sensibilidad de rojo, verde y azul respectivamente y  $X$ ,  $Y$  y  $Z$  son las coordenadas de color de visión humana.

**Figura 4-16.** Espectro de color CIE1931-2012



Fuente: Tomada de <http://cvrl.ioo.ucl.ac.uk/cmfs.htm>

Ahora es necesario convertir el espectro de color de visión humana a la matriz de color para los dispositivos digitales como son las pantallas de computadoras y este es el modelo de color adobe RGB, para ello se realiza una transformación lineal como se puede apreciar en la ecuación siguiente:

$$RGB_{linear} = \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = M_{RGB} * \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (4-8)$$

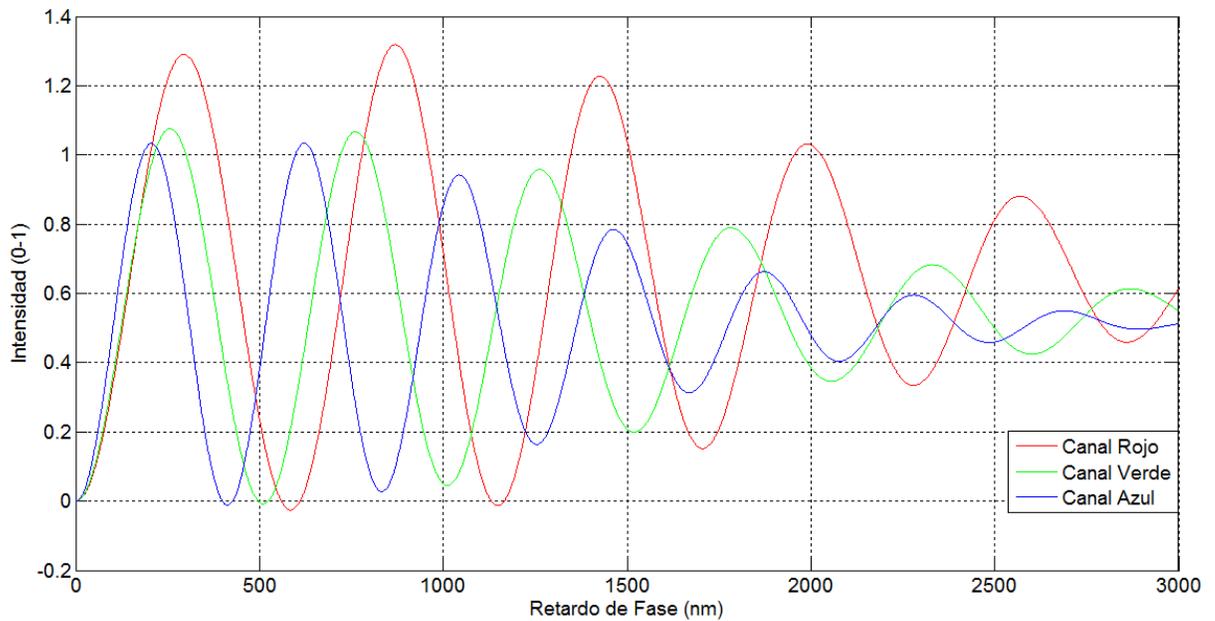
Donde la matriz de conversión adobe RGB es MRGB (Pascale, 2003):

$$MRGB = \begin{bmatrix} 2.0441 & -0.5649 & -0.3447 \\ -0.9693 & 1.8760 & 0.0416 \\ 0.0134 & -0.1184 & 1.0154 \end{bmatrix} \quad (4-9)$$

El espectro obtenido se puede apreciar en la siguiente

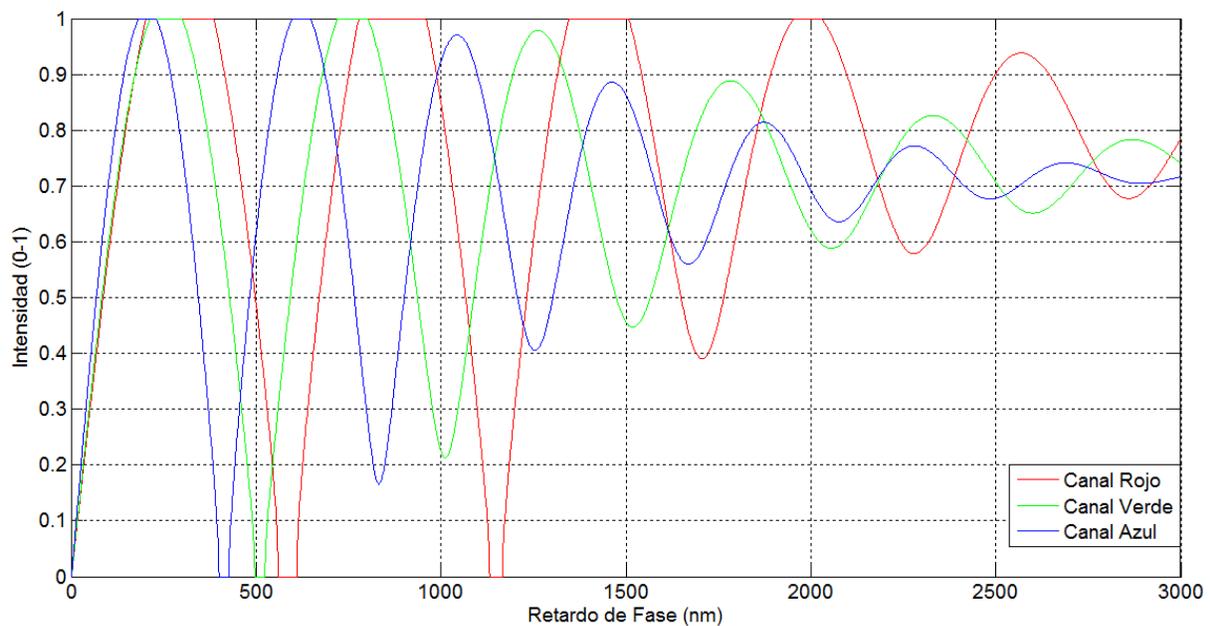
Figura 4-17:

**Figura 4-17.** Espectro imagen sintética de colores de interferencia sin ajuste.



Fuente: *Elaboración propia.*

Debido a que el resultado de la transformación lineal excedió los límites de 0 y 1 se realiza una corrección del gamma=0.5 y se recorta la cresta con el fin de que el blanco sea un verdadero blanco y no un gris claro (ver

**Figura 4-18).****Figura 4-18.** Espectro imagen sintética de colores de interferencia con ajuste de gamma

Fuente: *Elaboración propia.*

**Figura 4-19.** Imagen sintética de colores de interferencia.

Fuente: *Elaboración propia.*

### 4.3.1 Análisis

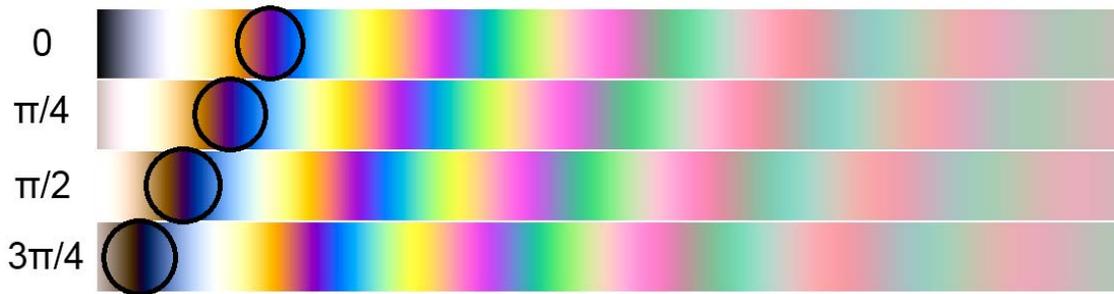
La imagen de colores de interferencia o imagen sintética se generó a partir de la ecuación de la luz de interferencia y esta permite modificar los ángulos entre los polarizadores y analizadores al igual que la función de color (CIE1931-2012) a la que se desea. La imagen obtenida muestra para cada retardo de fase la intensidad de color asociado al desfase, esta imagen en particular es un vector fila en donde cada columna  $j$  es un retardo ( $j$ =retardo), por ejemplo en la posición  $j=2000$  se ubica el color asociado al retardo de fase de 2000nm.

### 4.3.2 Conclusión

La imagen sintética contiene la gama total de colores de interferencia asociados a su retardo de fase y esta permite identificar en una imagen real adquirida el retardo de fase de un color específico y conociendo el retardo se conoce directamente el orden del color; y una de las ventajas de usar la imagen sintética es que se evita realizar un montaje complejo de adquisición múltiple simultáneas de videos de fotoelasticidad, también permite configurar diferentes escenarios simulando los ángulos de rotación de los polarizadores y especímenes.

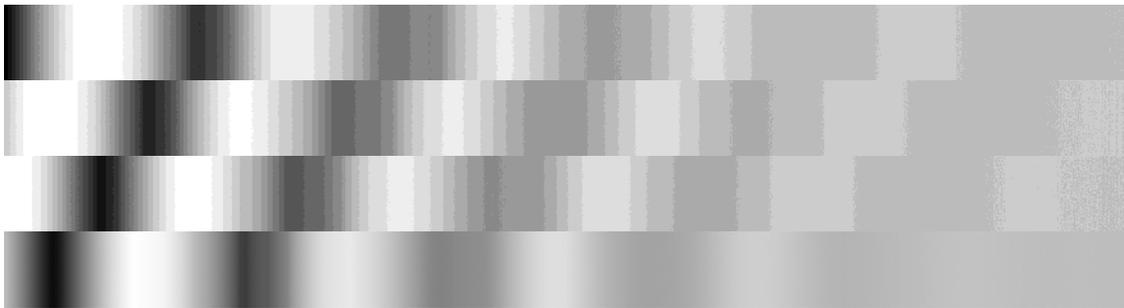
## 4.4 Generación imagen envuelta

La imagen sintética generada permite ser tratada con una de las técnicas más empleadas en fotoelasticidad digital, el cual es el “Desplazamiento de Fase” (*Phase Shifting*) y se basa en introducir un desplazamiento de fase específica a través de la rotación de los elementos ópticos del polariscopio (en nuestro caso se hace el desplazamiento de fase por la ecuación 4-5 usada en el algoritmo), lo que resulta en la modulación de fase sobre el dominio (ver Figura 4-20). Esta técnica requiere desenvolver las distribuciones periódicas del orden de la franja isocromática. (Siegmann, Patterson, & Backman, 2004). Para el polariscopio plano es necesario hacer cuatro pasos de desplazamiento de fase.

**Figura 4-20.** Imágenes sintéticas con 0,  $\pi/4$ ,  $\pi/2$  y  $3\pi/4$  de desfase respectivamente

Fuente: *Elaboración propia.*

Teniendo las cuatro imágenes con su respectivo desplazamiento de fase se procede a transformar en imágenes a escala de grises como se pueden apreciar en la Figura 4-21.

**Figura 4-21.** Imágenes sintéticas desfasadas en escala de grises

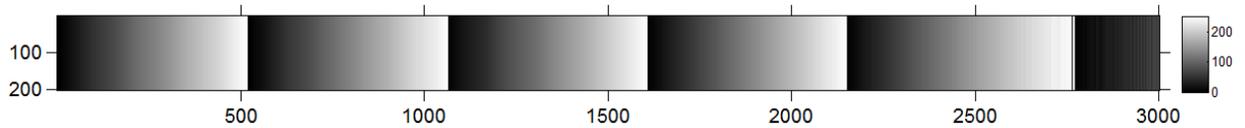
Fuente: *Elaboración propia.*

Para la realización de la imagen envuelta se emplea la función *atan2* de matlab el cual se expresa así:

$$I_{env} = \text{atan2}((I_4 - I_2), (I_1 - I_3)) \quad (4-10)$$

Donde,  $I_{env}$  es la imagen envuelta,  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  e  $I_4$  son las imágenes en grises con desplazamiento de fase. En la Figura 4-22 se puede apreciar la imagen envuelta:

**Figura 4-22.** Imagen envuelta, eje x es el retardo en nm



Fuente: *Elaboración propia.*

#### 4.4.1 Análisis

En las imágenes sintéticas de la Figura 4-20 y la Figura 4-21 se puede apreciar un corrimiento de las franjas hacia el lado izquierdo correspondiente a un desfase de  $\pi/4$ , posteriormente en la Figura 4-22 se muestra el resultado del envolvimiento en la cual se visualiza cambios marcados de intensidad (blanco pasa a negro) que está asociado a los cambios de orden de la imagen sintética generada (5 órdenes para este caso).

#### 4.4.2 Conclusión

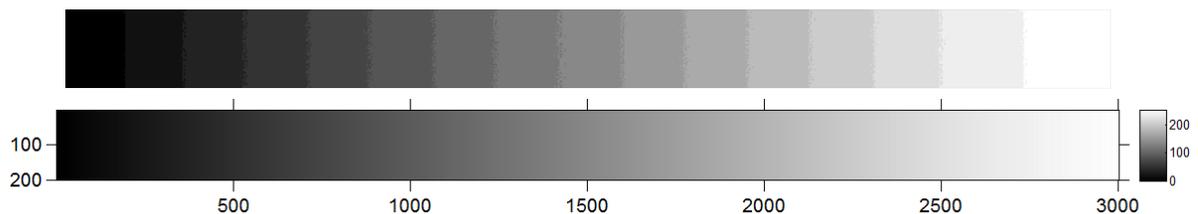
La imagen envuelta a partir de una imagen sintética permite identificar los órdenes de los colores de interferencia sin necesidad de realizar un montaje de desplazamiento de fase.

### 4.5 Generación de imagen desenvuelta

Con la imagen envuelta es necesario realizar el desenvolvimiento fase para justificar que se cumple con la técnica de desplazamiento de fase y así poder hacer la conversión de las imágenes reales a imágenes sintético-reales.

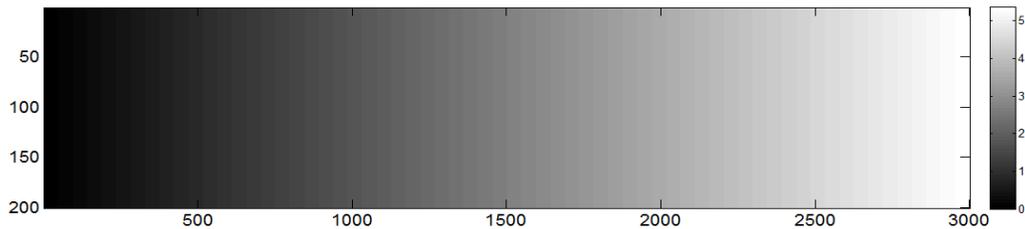
Empleando la función de **Matlab** “unwrapp”, se realiza el desenvolvimiento de franjas el cual se puede apreciar en la Figura 4-23 y 24.

**Figura 4-23.** Imagen desenvuelta, eje x corresponde al retardo de fase



Fuente: *Elaboración propia.*

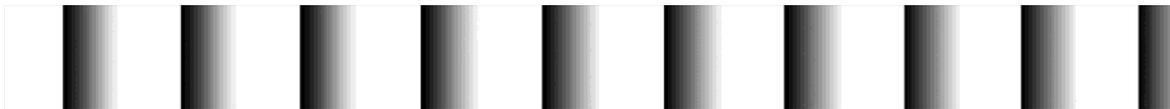
**Figura 4-24.** Imagen desenvuelta, la barra de intensidades correspondientes a los órdenes



Fuente: *Elaboración propia.*

Usando herramientas computacionales para el tratamiento de imágenes como el **ImageJ** y el plugins **HoloJ** y específicamente la función **UnwrapJ** se puede realizar el desenvolvimiento de fase así como se puede apreciar en la Figura 4-26 .

**Figura 4-25.** Imagen envuelta desde 0 a  $\pi$



Fuente: *Elaboración propia.*

**Figura 4-26.** Imagen desenvuelta por UnwrapJ



Fuente: *Elaboración propia.*

**Figura 4-27.** Imagen envuelta desde  $-\pi$  a  $\pi$



Fuente: *Elaboración propia.*

**Figura 4-28.** Imagen desenvuelta por UnwrapJ



Fuente: *Elaboración propia.*

### 4.5.1 Análisis

La imagen resultante después del desenvolvimiento es una imagen con intensidades de retardo de fase creciente hacia la derecha en su eje x (columnas) y esta imagen también puede ser convertida en una imagen de órdenes.

### 4.5.2 Conclusión

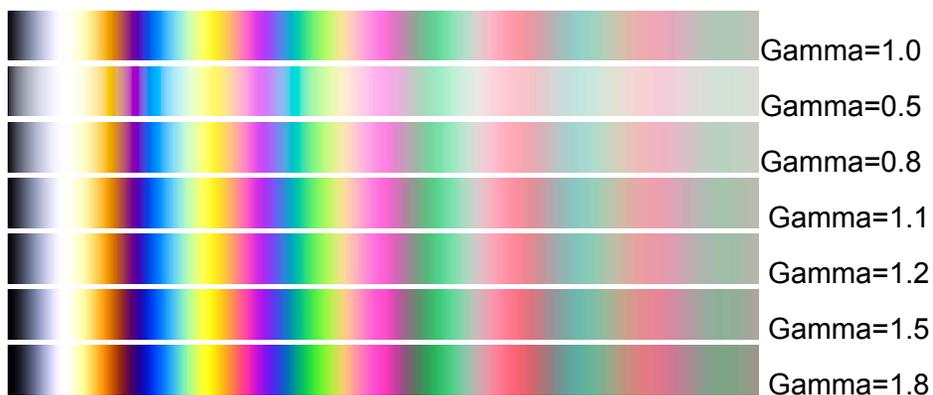
El uso de la técnica de envolvimiento y desenvolvimiento fase permite evaluar la imagen sintética generada en donde nos indica que no tiene cambios de fase repentinos ni ruido que pudiese afectar el desenvolvimiento de esta.

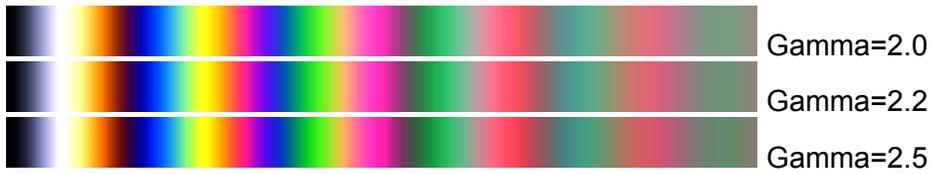
## 4.6 Efecto de iluminación

En la adquisición de las imágenes de fotoelasticidad la iluminación juega un papel importante en la intensidad de los colores, dentro del procedimiento que se ejecutaran en el análisis de las imágenes se tienen comparación de color real vs color de imagen sintética y también se realizara un aprendizaje del color para la estimación del espesor, por tal razón se quiere comprobar que el efecto de la iluminación afecta la transformación de las imágenes reales a sintético-real

El experimento se basa en el ajuste del gamma a nueve duplicados de la imagen sintética, los ajustes son: gamma=1, 0.5, 0.8, 1.1, 1.2, 1.5, 1.8, 2, 2.2 y 2.5 (ver Figura 4-29).

**Figura 4-29.** Imágenes resultantes del ajuste del Gamma

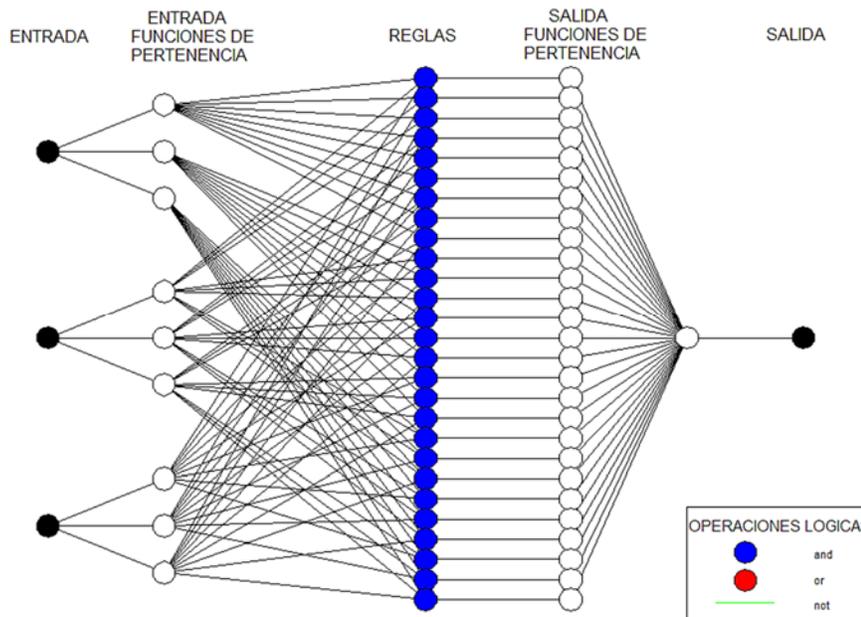




Fuente: Elaboración propia.

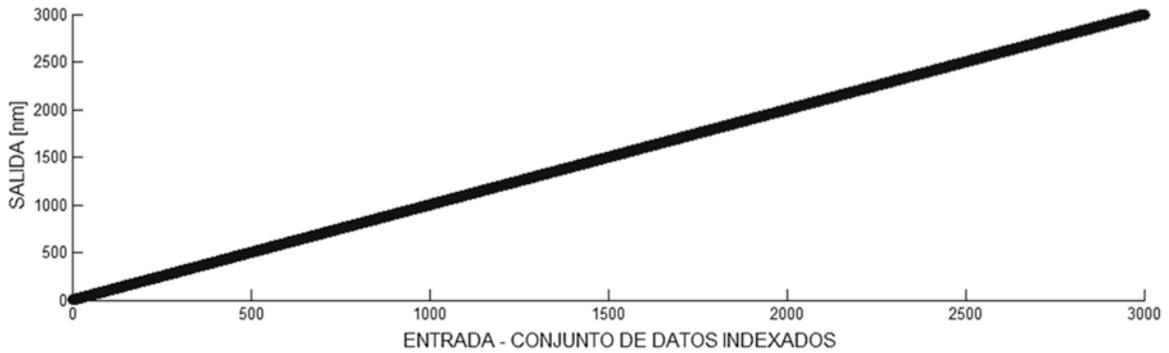
Se emplea un modelo neurodifuso ANFIS (*Adaptive Network Fuzzy Inference system*) de Matlab tipo Sugeno para realizar un entrenamiento supervisado de aprendizaje teniendo tres entradas que son los canales R, G y B, se toman tres conjuntos de inferencia tipo campana de gauss y la salida lineal es el retardo (ver Figura 4-30), se hace el entrenamiento con la imagen sintética original con gamma=1 y normalizada sus entradas entre 0-1. En la Figura 4-31 se puede apreciar la gráfica del conjunto de datos vs salida y es una recta debido a que la imagen sintética tiene desde 0 hasta 3000 nm de retardo de fase.

Figura 4-30. Estructura del modelo ANFIS



Fuente: Tomada del toolbox ANFIS de Matlab.

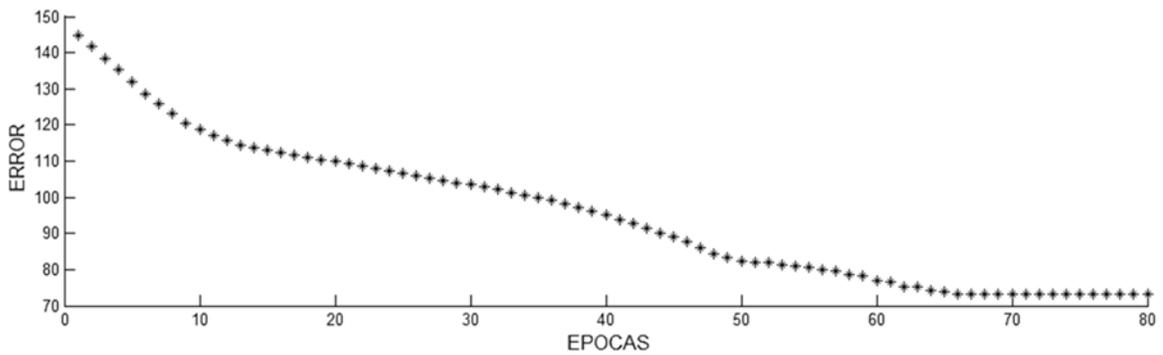
Figura 4-31. Grafica de conjunto de datos vs salida [retardo nm]



Fuente: Tomada del resultado en el toolbox ANFIS de Matlab.

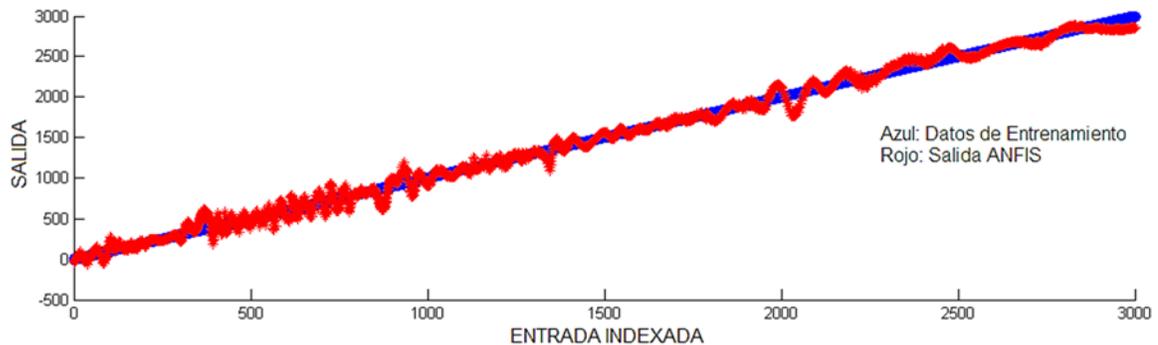
El entrenamiento supervisado de la ANFIS requirió 65 épocas para llegar al error mínimo de 2.441% como se puede observar en la Figura 4-32 y en la Figura 4-33 muestra la comparación entre la salida deseada contra la evaluación de la ANFIS.

**Figura 4-32.** Grafica de evolución del error de entrenamiento



Fuente: Tomada del resultado en el toolbox ANFIS de Matlab.

**Figura 4-33.** Grafica de salida de entrenamiento contra la salida evaluada con los datos de prueba.



Fuente: Tomada del resultado en el toolbox ANFIS de Matlab.

En la Tabla 4 se presenta el valor del error para cada imagen (imagen con los ajuste del gamma) evaluada en el modelo ANFIS.

**Tabla 4.** Resultados del error por evaluación de la ANFIS entrenada

<b>Gamma</b>	<b>Error[%]</b>
1	2.441
0.5	44.48
0.8	19.67
1.1	14.42
1.2	31.32
1.5	97.54
1.8	177.57
2	233.98
2.2	291.17
2.5	303.67

*Fuente: Elaboración propia.*

#### **4.6.1 Análisis**

Los resultados obtenidos indican que la variación del gamma afecta directamente el rendimiento de la ANFIS. Con solo una variación del gamma en 0.1 se tiene un aumento del error del 12%.

#### **4.6.2 Conclusión**

El experimento confirma la importancia de la iluminación en la adquisición de imágenes de fotoelasticidad. En el montaje real la cámara se encuentra de frente a la fuente de luz blanca y el color blanco hace parte de colores de interferencia y al ajustar la cámara se evita la saturación de blancos, esto trae consigo una reducción de intensidad que afectaría la similitud del color real contra la imagen sintética.

### **4.7 Selección de imagen sintética**

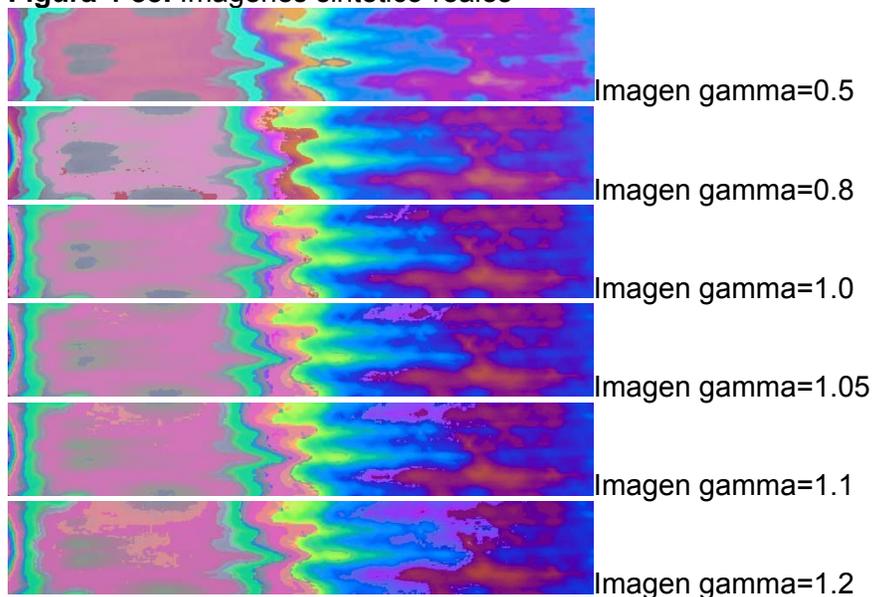
Luego de justificar la importancia de la iluminación es necesario definir cuál de las imágenes sintéticas a las que fue corregido el gamma tiene mayor correlación con los colores de una imagen real, para ello es necesario realizar la transformación de una imagen real de muestra adquirida en los experimentos de deformación de la PPMC (Película Plástica Multicapa), en nuestro caso es seleccionado el *frame* 150 del video 1 de la deformación a  $T=20^{\circ}\text{C}$  (ver Figura 4-34) ya que esta imagen contiene colores de interferencia de bajo y alto orden. Posteriormente se realiza una tabla por cada imagen sintética generada anteriormente (ver Figura 4-19), esta consta de tres columnas correspondientes al valor en intensidad del R, G y B, una columna asociado al retardo de fase que corresponde al igual número de filas ( $1-3000\text{pix} = 0-2999\text{nm}$ ), luego con esta tabla se procede a desmodular (método de comparación por el mínimo error cuadrático); con este proceso se obtienen 11 imágenes desmoduladas (imágenes sintético-reales) por cada imagen sintética con ajuste del gamma como se puede apreciar en la Figura 4-35.

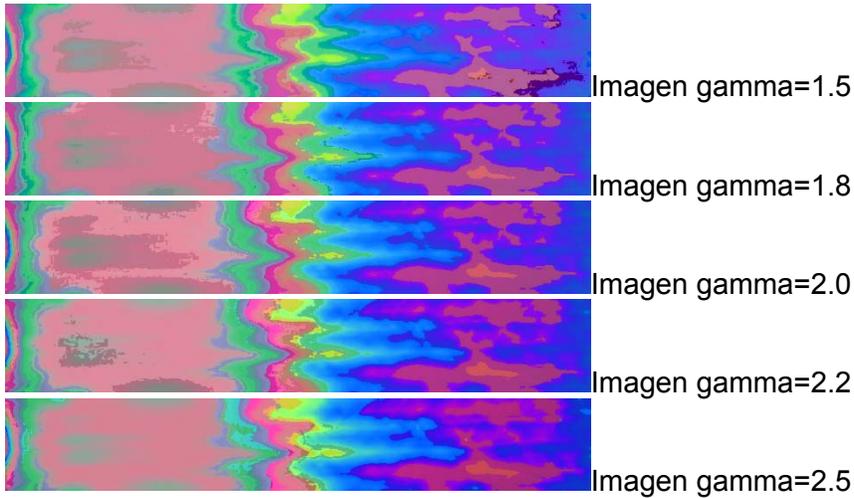
**Figura 4-34.** Imagen real, *frame* 150, video 1, deformación a  $T=20^{\circ}\text{C}$



*Fuente: Elaboración propia.*

**Figura 4-35.** Imágenes sintético-reales





Fuente: Elaboración propia.

Obtenidas las imágenes sintético-reales se procede con la correlación digital de imágenes para identificar cuál de las imágenes tiene mayor correlación con la imagen de muestra, en la Tabla 5 muestra los resultados de la correlación por canal de color, promedio de canales y por correlación directa de la imagen dando como resultado que la imagen con corrección del gamma de 0.8 tiene la mayor correlación sobre el canal rojo y además este canal esta directamente involucrado en los cambios de orden.

**Tabla 5.** Resultado de Correlación de imagen real vs imágenes sintético-real

Imagen corrección del Gamma	Correlación Canal Rojo	Correlación Canal Verde	Correlación Canal Azul	Correlación Promedio Canales	Correlación de Imagen Directa
0.5	0.9488	0.9226	0.7923	0.8879	0.9354
0.8	0.9831	0.9642	0.8444	0.9306	0.9618
1.0	0.9823	0.9750	0.8607	0.9393	0.9670
1.05	0.9802	0.9706	0.8656	0.9388	0.9659
1.1	0.9776	0.9651	0.8704	0.9377	0.9641
1.2	0.9708	0.9494	0.8777	0.9327	0.9564
1.5	0.9789	0.9366	0.8356	0.9170	0.9489
1.8	0.9756	0.9521	0.8494	0.9257	0.9517
2.0	0.9716	0.9425	0.8716	0.9286	0.9511
2.2	0.9723	0.9443	0.8767	0.9311	0.9525
2.5	0.9700	0.9600	0.8768	0.9356	0.9545

■ Máxima correlación

Fuente: Elaboración propia.

### 4.7.1 Análisis

La correlación arroja resultados de similaridad entre las imágenes y con la tabla anterior se puede apreciar que la imagen sintética generada con  $\gamma=0.8$  es la de mayor correlación con la imagen real en el canal rojo. Este resultado puede indicar dos cosas, (1) que el método de comparación por el mínimo error cuadrático es efectivo y encuentra el mejor tono de color para la asignación de la nueva imagen sintético real; (2) que las imágenes reales adquiridas se aproximan en un 96.18% a los colores genéricos de interferencia y por ende se realizó una calibración de color adecuada.

### 4.7.2 Conclusión

Es este experimento la imagen sintético-real de  $\gamma=0.8$  seleccionada es la más ajustada a las intensidades de los colores de las imágenes reales adquiridas, el cual va a permitir hacer las conversiones de las imágenes reales a sintético-reales y conocer el comportamiento del retardo durante la deformación.

## 4.8 Demodulación de color y retardo de fase

En la realización de las correlaciones de intensidad visto anteriormente se utilizó el video No.9 tanto para  $T=20^{\circ}\text{C}$  como  $T=60^{\circ}$ ; con las imágenes reales del video se realizará la demodulación de color a cada imagen correspondiente a cada frame, utilizando la imagen sintética como tabla de calibración se genera una nueva imagen demodulada llamada imagen sintético-real, el cual para cada pixel de esta imagen se conoce el retardo de fase permitiendo así generar una imagen de intensidades de retardo de fase.

El método consiste en la comparación de las componentes de color de un pixel con los de la tabla de color sintética generada, el cual se calcula el error mínimo cuadrado 'e' para cada fila i en la tabla de color sintética utilizando la fórmula de diferencia de color mencionada en la ecuación 1:

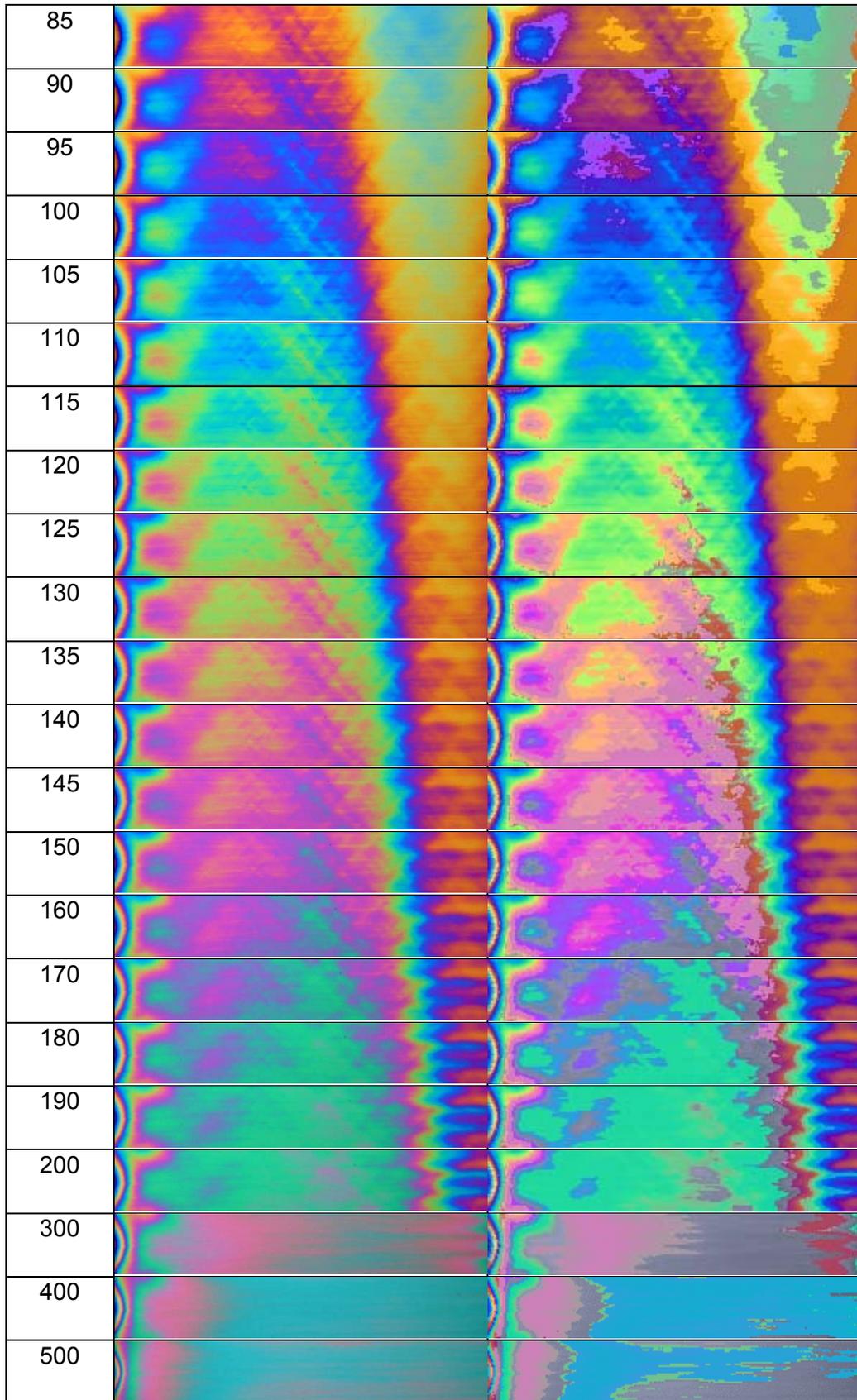
$$e_i = \sqrt{(R - R_i)^2 + (G - G_i)^2 + (B - B_i)^2} \quad (4-11)$$

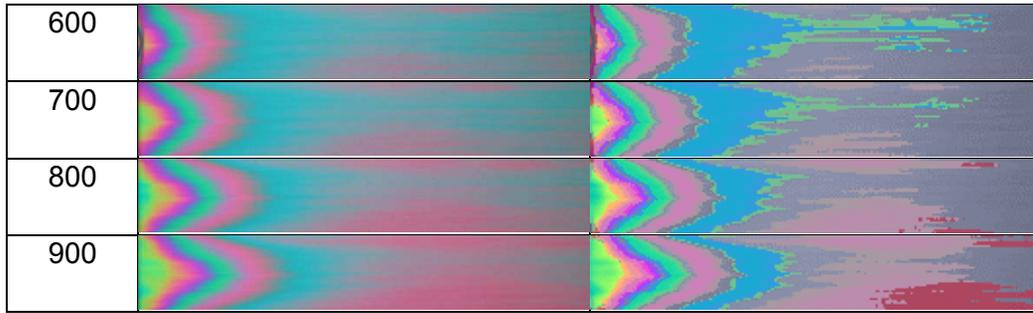
Donde  $R$  es la intensidad del canal Rojo del pixel y  $R_i$  es la intensidad de cada columna de la imagen sintética y así para los dos canales G y B.

A continuación en la Tabla 6 se muestra el resultado de la transformación de la imagen real vs la imagen sintético-real. Cabe aclarar que las imágenes mostradas han sido escaladas a un 20% debido a que cada comparación de cada imagen en escala real tarda computacionalmente 8900s ó 2.5 horas.

**Tabla 6.** Imágenes reales de deformación a  $T=20^{\circ}\text{C}$  vs Imágenes sintético-reales

Frame	Imagen Real	Imagen Sintético-real
10		
15		
20		
25		
30		
35		
40		
45		
50		
55		
60		
65		
70		
75		
80		





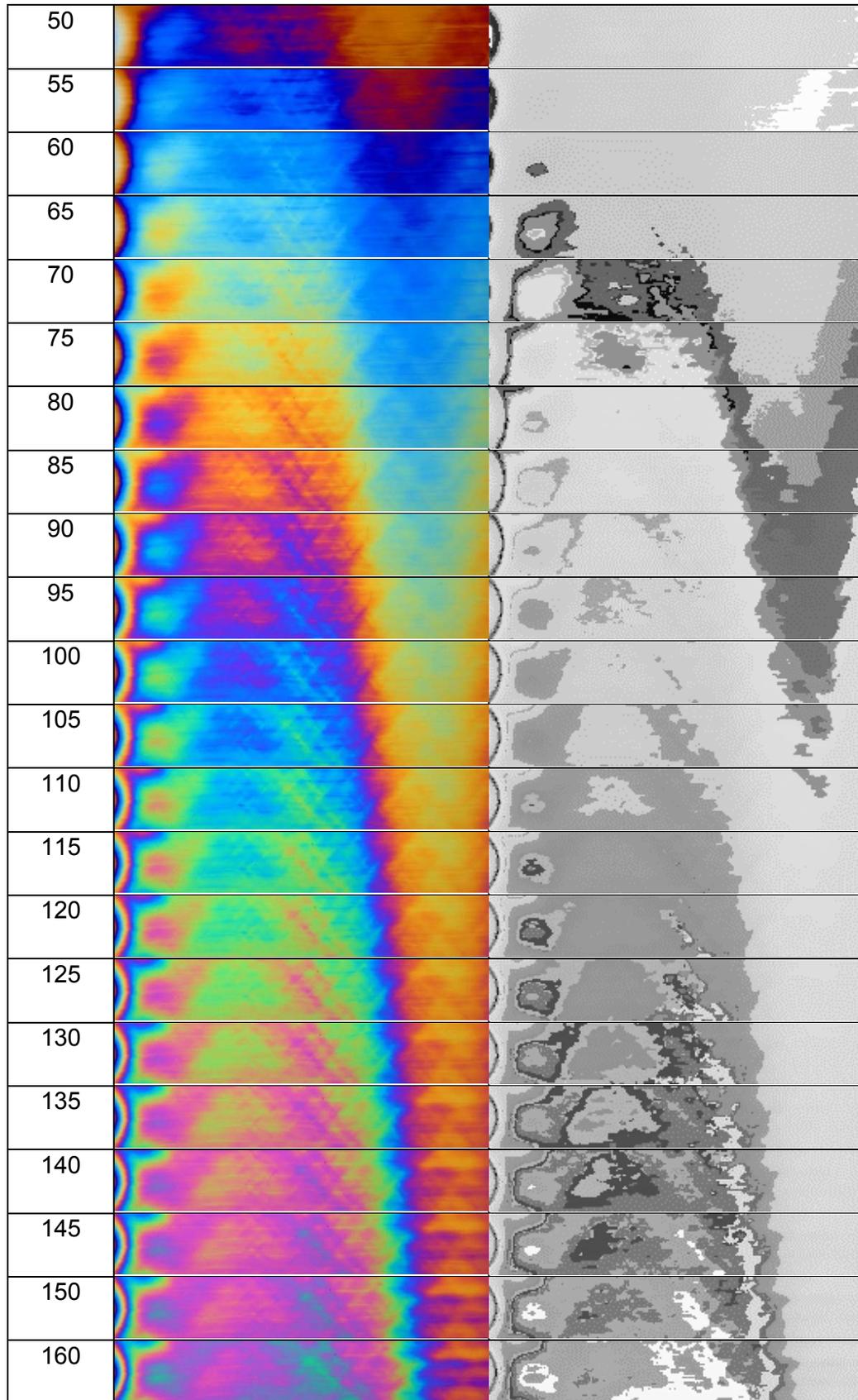
Fuente: Elaboración propia.

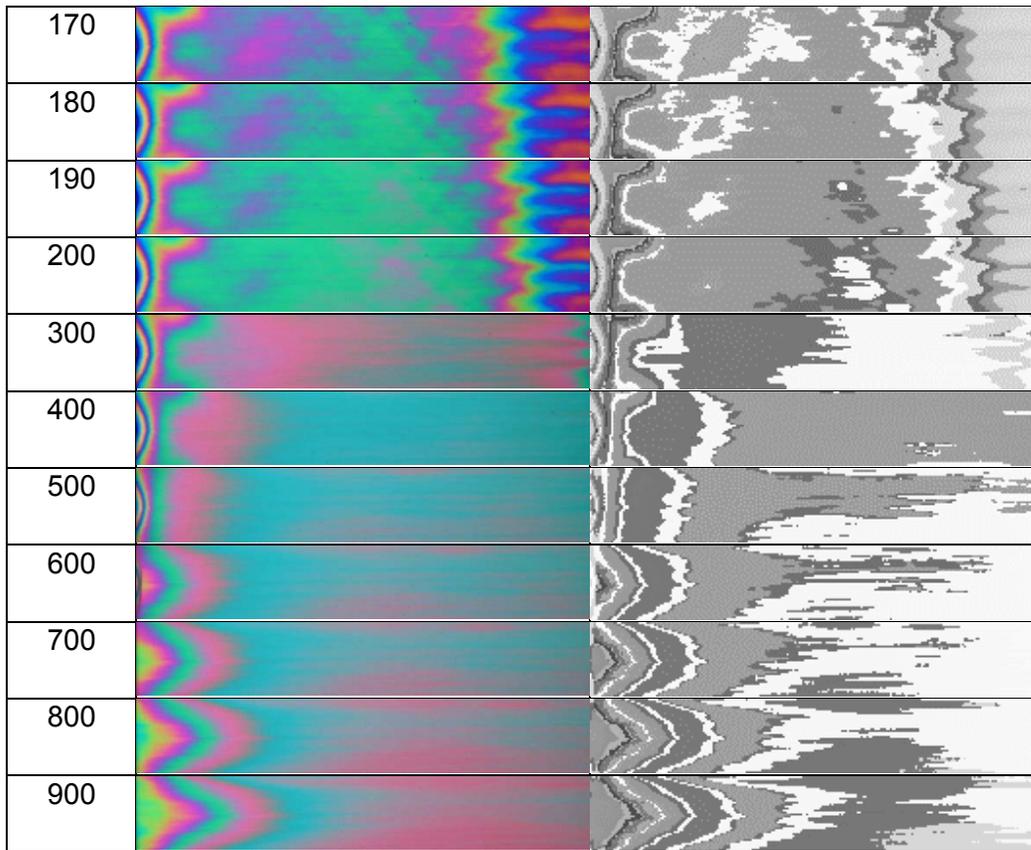
#### 4.8.1 Generación imagen de retardos de fase

En la imagen desenvuelta obtenida (ver Figura 4-23) se conoce los valores de retardo para cada pixel que fueron extraídos de la imagen sintética con la cual podemos generar una nueva imagen de retardos a partir de la imagen sintético-real. En la Tabla 7 se puede apreciar la dinámica del retardo durante la deformación, las imágenes se presentan en escala de grises en donde el menor valor de retardo de fase 0.0nm corresponde al blanco y el mayor 3000nm el color negro.

**Tabla 7.** Imágenes reales de deformación a  $T=20^{\circ}\text{C}$ , Imagen de retardo (blanco: 0nm, negro: 3000nm)

Frame	Imagen Real	Imagen Retardo
10		
15		
20		
25		
30		
35		
40		
45		





#### 4.8.2 Análisis

En las imágenes de retardo de fase se puede apreciar que entre el frame 10 y el 120 corresponde a 4 segundos de la deformación y se presenta un desplazamiento de franjas hacia la derecha, lo cual indica que el material se está desplazando y saliendo del campo de visión de la cámara, Luego entre los frames 120 y 200 la dinámica de las franjas se dan en la zona cercana a las mordazas mostrando un oscurecimiento que indica el aumento del retardo de fase.

Se observan franjas muy claras a partir del frame 300 hasta el 900 que no tiene sentido de su aparición debido a que la serían retardos muy bajos y la película plástica ya tiene una deformación considerable para este frame y además en frames anteriores al 150 la intensidad del gris es mayor, esta inconsistencia podría deberse a que la asignación del color por comparación en estas imágenes que presentan mayor orden presente mayor

error y una asignación de color de menor orden ocasionando así una imagen de retardo no precisa.

### 4.8.3 Conclusión

Partiendo de lo observado en las imágenes de retardo generadas se puede decir que pasados 5 segundos de deformación (150 frames) se presentan en las imágenes reales órdenes superiores a cuatro en donde se tienen poca variación en sus intensidades R,G y B como se pudo observar en las curvas de correlación (ver Figura 4-4), y por ende el algoritmo de asignación de retardo por comparación de color presenta problemas asignando así un color que representa un retardo menor al real.

## 4.9 Estimación espesor por ANFIS

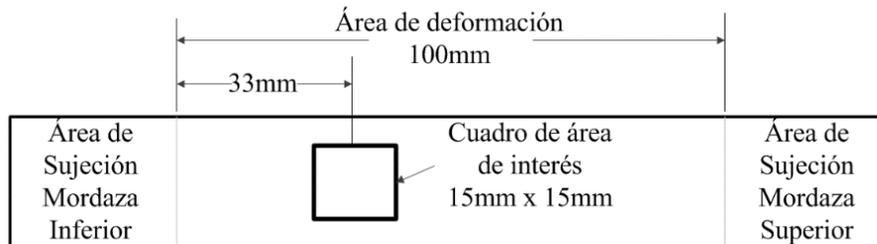
En el experimento anterior se generaron imágenes sintético-reales que fueron transformadas en imágenes de retardo de fase que representan la diferencia de esfuerzos; durante la deformación de la película el espesor es una variable que está relacionada con el esfuerzo, por tal razón es importante correlacionar de manera cualitativa la relación entre el retardo y el espesor.

Para llevar a cabo la estimación del espesor es necesario obtener un conjunto de datos en donde se relaciona las intensidades de color con el espesor medido (Canales R, G, B, H, S, I vs espesor medido) que permita entrenar de manera supervisada un modelo neurodifuso ANFIS (*Adaptive Network Fuzzy Inference system*) de Matlab tipo Sugeno y posteriormente usar este modelo para transformar las imágenes reales en imágenes de espesor.

Para el experimento se preparan seis probetas de PPMC, cuatro de ellas son deformadas a temperatura ambiente (20°C) y dos son termodeformada a 60°C; luego de tener el montaje listo se toma la primera imagen en tiempo cero ( $t_0$ ), inmediatamente se realizan

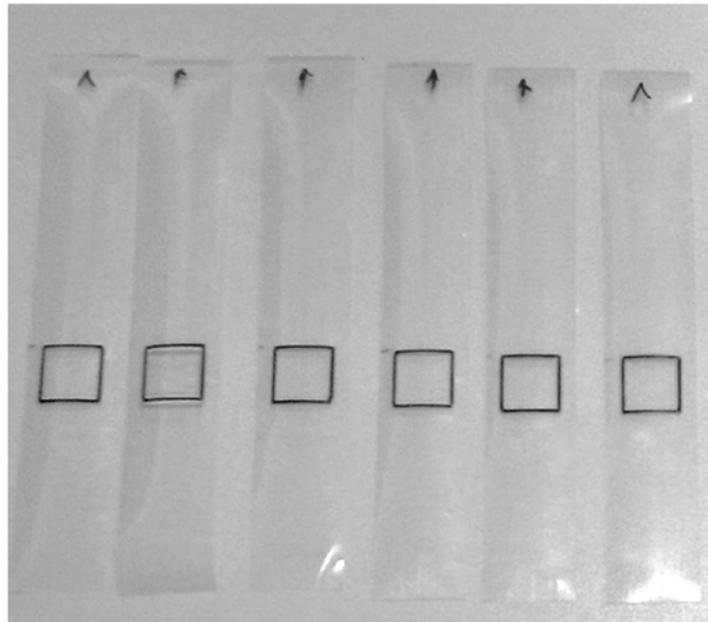
las mediciones de espesor usando el micrómetro en los nueve puntos dentro del recuadro (ver Figura 4-36 y 37); posteriormente se inicia la deformación presionando el botón “*test*” de la máquina y pasados dos segundos ( $t_i$ ) se vuelve a presionar el botón “*test*” y la máquina de tracción se detiene, se toma una imagen y se procede a tomar las mediciones en los nueve puntos y así sucesivamente hasta realizar 20 paradas o hasta que el recuadro supere los límites del campo de visión de la cámara en cada película; en la Tabla 8 se puede apreciar las imágenes adquiridas de la primera película deformada y en la columna “recuadro” se ven las imagen recortada en la zona interna del recuadro, posteriormente cada imagen de recortada es nuevamente recortada en los centroides de los nueve puntos de medición obteniendo así las imágenes con la cual se extractará la media del canal R, G, B, H, S e I para su respectivo espesor medido, en la Tabla 9 se muestran las 199 mediciones de las 22 paradas de la primera deformación. En este procedimiento se obtuvieron 1035 datos de entrenamiento. Cabe resaltar que las imágenes de espesor muestran que la deformación es por regiones y las franjas se desplazan a medida que el material es estirado, también algunos bordes de las franjas mantienen el espesor y a su vez se traslada por la región de interés “ROI”.

**Figura 4-36.** Dimensiones y ubicación del recuadro de mediciones



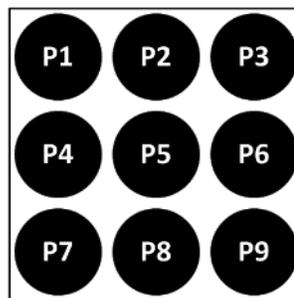
Fuente: *Elaboración propia.*

**Figura 4-37.** Fotografía de recuadro dibujado en la PPMC



Fuente: Elaboración propia.

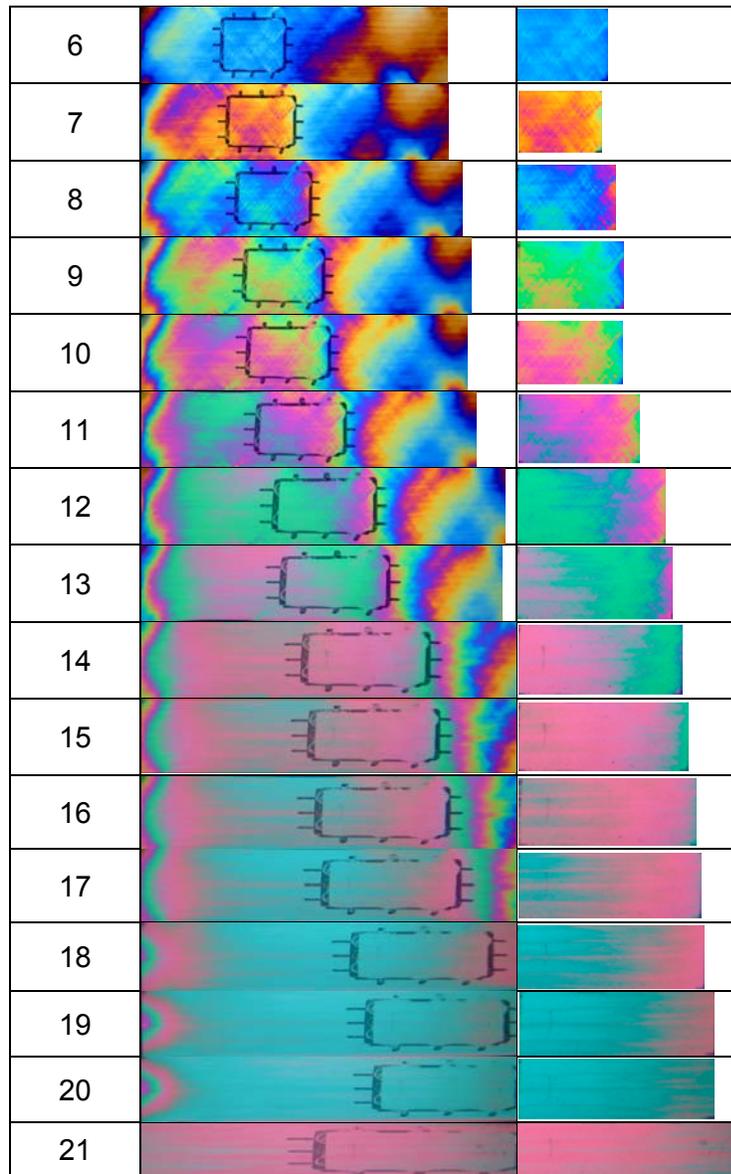
**Figura 4-38.** Puntos de medición en el recuadro



Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 8.** Imágenes de paradas

Recuadro	Imagen Adquirida	Recuadro
1		
2		
3		
4		
5		



Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 9.** Punto de medición "P" y espesor medido "t" [micras] del primer video

Parada	P1	t1	P2	t2	P3	t3	P4	t4	P5	t5	P6	t6	P7	t7	P8	t8	P9	t9
1		134.9		134.9		134.9		134.9		134.9		134.9		134.9		134.9		134.9
2		133.7		133.7		133.7		133.7		133.7		133.7		133.7		133.7		133.7
3		132.4		132.4		132.4		132.4		132.4		132.4		132.4		132.4		132.4
4		131.1		131.1		131.1		131.1		131.1		131.1		131.1		131.1		131.1
5		129.9		129.9		127.3		129.9		129.9		129.9		129.9		129.9		129.9
6		127.3		127.3		127.3		127.3		127.3		127.3		127.3		127.3		127.3
7		127.3		126.1		126.1		124.8		124.8		126.1		126.1		126.1		126.1
8		124.8		124.8		123.5		124.8		123.5		123.5		124.8		124.8		123.5
9		123.5		122.3		123.5		124.8		123.5		122.3		123.5		122.3		122.3
10		122.3		121.0		121.0		122.3		119.7		119.7		119.7		121.0		119.7
11		119.7		119.7		118.4		119.7		118.4		118.4		118.4		117.2		117.2
12		115.9		115.9		115.9		117.2		115.9		114.6		114.6		114.6		114.6
13		112.1		112.1		113.4		114.6		112.1		112.1		112.1		109.6		109.6
14		109.6		107.0		107.0		109.6		107.0		107.0		107.0		107.0		105.7
15		104.5		104.5		104.5		104.5		104.5		103.2		103.2		103.2		101.9
16		103.2		101.9		101.9		103.2		103.2		103.2		101.9		101.9		100.7
17		99.4		99.4		100.7		100.7		100.7		101.9		101.9		100.7		100.7
18		99.4		99.4		99.4		100.7		99.4		99.4		99.4		99.4		99.4
19		99.4		99.4		98.1		100.7		99.4		98.1		99.4		99.4		99.4
20		99.4		98.1		98.1		98.1		98.1		99.4		98.1		98.1		98.1
21		98.1		98.1		96.9		99.4		98.1		96.9		98.1		98.1		98.1
22		81.6		81.6		81.6		81.6		81.6		81.6		81.6		81.6		81.6

Fuente: Elaboración propia.

### 4.9.1 Selección función de pertenencia de la ANFIS

Con el conjunto de datos de entrenamiento generado se evalúan diferentes configuraciones de parámetros del ANFIS-Matlab® (ver Tabla 10) y se selecciona el mejor rendimiento, en este caso la función de pertenencia gaussiana combinada arrojo el menor error de 8.2%. Esta función se usa en el entrenamiento con seis entradas (RGBHSI) y tres funciones de pertenencia y da como resultado un error de 4.63%.

**Tabla 10.** Selección de parámetros ANFIS

No. de entradas	No. de Funciones de Pertenencia	Tipo de Función de Pertenencia	Tipo de Función Pertenencia de salida	Épocas al mínimo error	Error	% Error
3	3	Triangular	Lineal	22	6.17	9.79
3	3	Trapezoidal	Lineal	36	6.28	9.96
3	3	Campana	Lineal	46	5.46	8.66
3	3	Gaussiana	Lineal	27	5.64	8.95
3	3	Gaussiana combinada	Lineal	70	5.17	8.20
3	3	Forma pi ( $\pi$ )	Lineal	91	5.35	8.49
3	3	Diferencia dos sigmoidales	Lineal	70	5.34	8.47
3	3	Producto dos sigmoidales	Lineal	70	5.34	8.47
6	3	Gaussiana combinada	Lineal	20	2.92	4.63

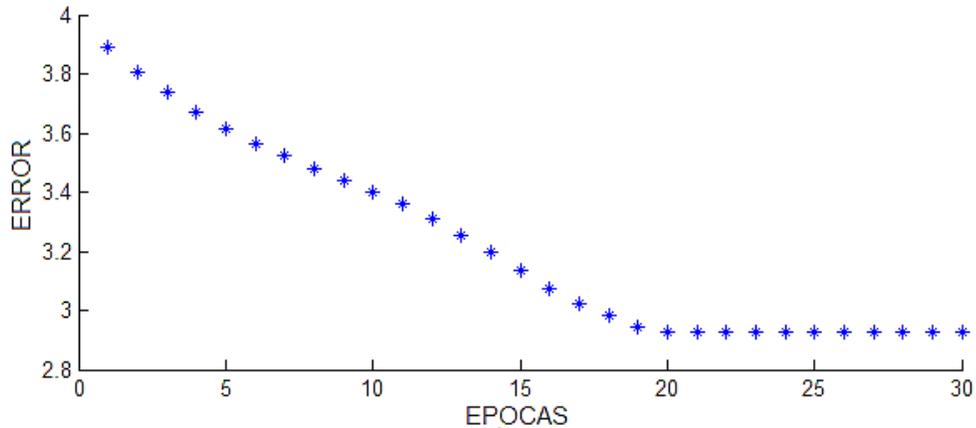
■ Máximo rendimiento

Fuente: Elaboración propia.

El ANFIS tiene seis entradas que corresponden a los canales R, G, B, H, S e I de la imagen real y su salida es el espesor medido en el procedimiento anterior, en la Figura 4-40 se muestra la salida con respecto a la cantidad de datos de entrenamiento, se puede apreciar que una línea con comportamiento lineal ya que los datos se ordenaron en orden ascendente.

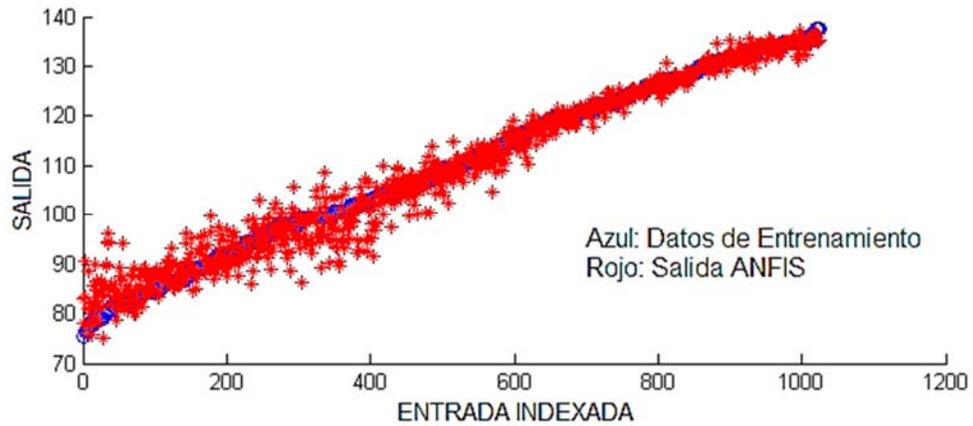
El entrenamiento arroja una curva del error mostrado en la Figura 4-39 que se vuelve asintótica en el valor 3.06 a partir de la época 8. Luego del aprendizaje se evalúa el modelo ANFIS dando como resultado la Figura 4-39 en la cual se hay disipación en la zona de menor espesor por ende se espera que en las imágenes de espesor se obtenga poca exactitud.

**Figura 4-39.** Curva de Error de aprendizaje ANFIS vs Épocas



Fuente: Tomada del resultado en el toolbox ANFIS de Matlab.

**Figura 4-40.** Prueba de Aprendizaje



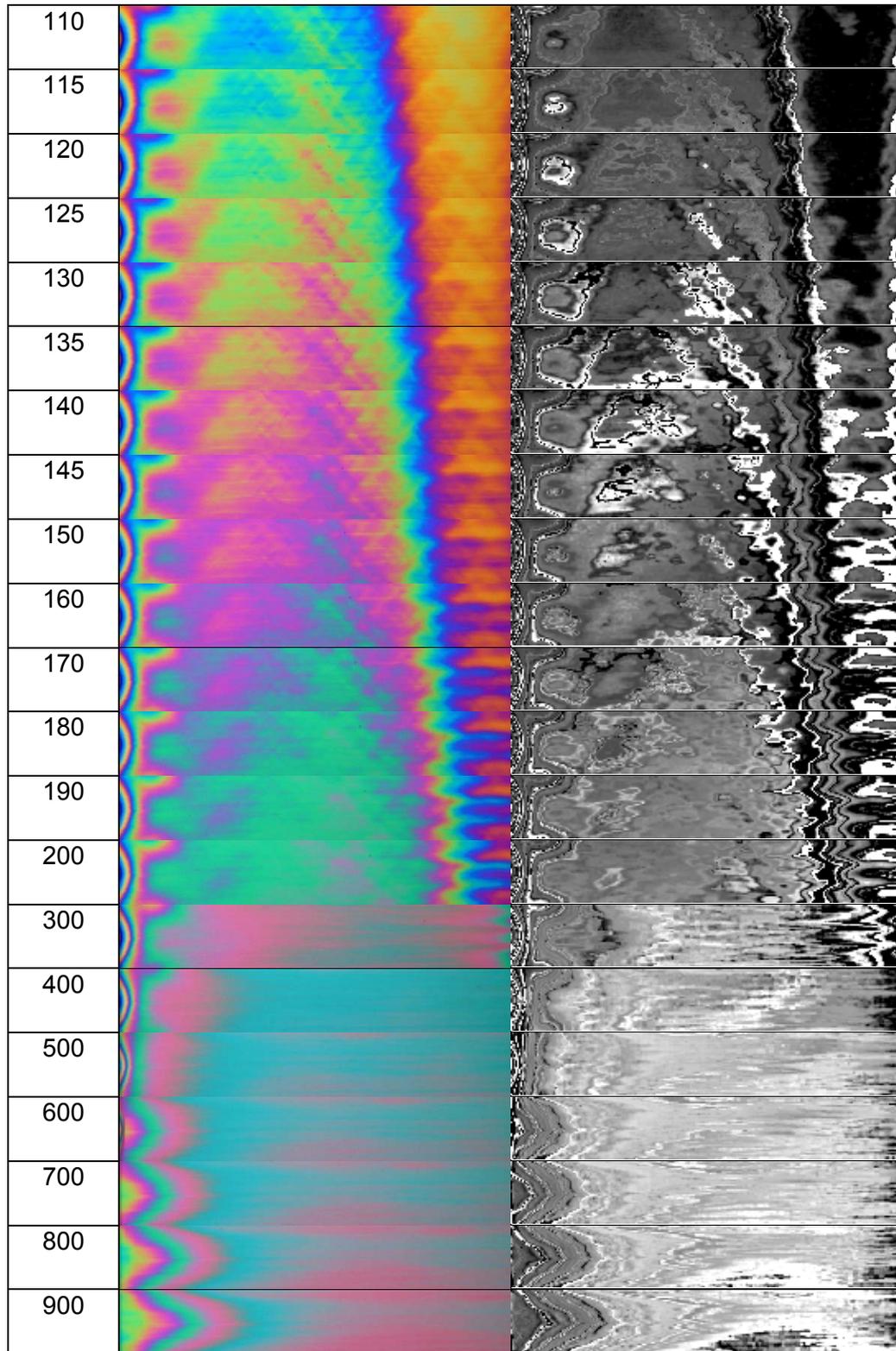
Fuente: Tomada del resultado en el toolbox ANFIS de Matlab.

### 4.9.2 Generación imagen de espesores

En el subcapítulo 4.9.21 se obtienen imágenes de retardo de fase donde cada pixel tiene un valor de intensidad que corresponde al desfase y está dado en nm, ahora con el modelo ANFIS entrenado se procede a evaluar las imágenes reales para transformarla en una imagen de espesores (Ver Tablas 11 y 12).

**Tabla 11.** Imágenes reales de deformación a  $T=20^{\circ}\text{C}$ , Imagen de espesor (negro:  $138\mu\text{m}$ , blanco:  $75\mu\text{m}$ )

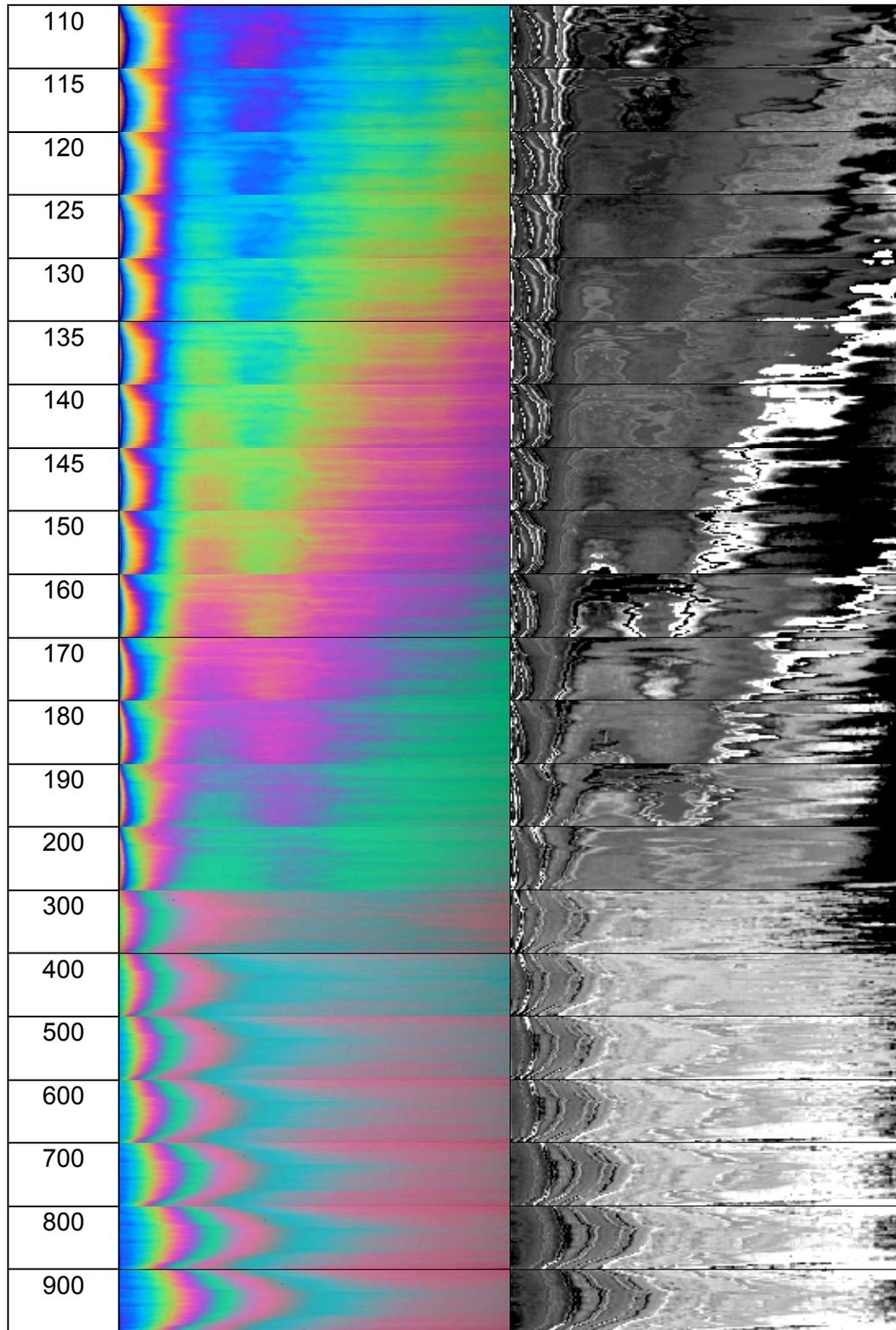
Frame	Imagen Real	Imagen Espesor
10		
15		
20		
25		
30		
35		
40		
45		
50		
55		
60		
65		
70		
75		
80		
85		
90		
95		
100		
105		



Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 12.** Imágenes reales de deformación a  $T=60^{\circ}\text{C}$ , Imagen de espesor (negro:  $138\mu\text{m}$ , blanco:  $75\mu\text{m}$ )

Frame	Imagen Real $T=60^{\circ}\text{C}$	Imagen Espesor
10		
15		
20		
25		
30		
35		
40		
45		
50		
55		
60		
65		
70		
75		
80		
85		
90		
95		
100		
105		



Fuente: Elaboración Propia.

### 4.9.3 Análisis

Las imágenes de espesor mostradas en la tabla anterior están representadas en una escala de grises (negro=138 micras y blanco=75 micras) y se puede observar que el espesor no es totalmente homogéneo debido a que la deformación afecta por zonas la película plástica.

Cerca de la mordaza (lado izquierdo de la imagen de espesores) se presentan unas franjas con tonalidad blanca y otras negras, lo cual puede indicar que hay franjas en la película plástica durante la deformación que no presenta cambios de espesor (caso de la franja negra) y que otras franjas mantienen el espesor inicial hasta que la totalidad de la deformación sea ejecutada. También puede suceder que la ANFIS está entregando valores con mayor error del entrenamiento debido a que en los datos de entrada estén por fuera del rango de las intensidades de color entrenadas,

El entrenamiento juega un papel importante en la estimación con menor error del espesor asociado al color, durante el entrenamiento se debe hacer una base de datos que abarque la mayor cantidad de colores posibles dentro del espectro visible con una medición de alta precisión del espesor; en la Tabla 9 se puede apreciar que los colores asociados a la deformación de toma de datos no tiene la gama completa de colores de interferencia, dejando así tonalidades por fuera del entrenamiento, además el área de contacto del micrómetro inscribe alrededor de 9300 pixeles, ya que el diámetro vástago de medición es de aproximadamente 108 pixeles, esto afecta directamente la confiabilidad del entrenamiento.

### 4.9.4 Conclusión

La red neuronal debe ser entrenada con mayor número de datos que abarquen la gama de colores de interferencia presentados durante una deformación, con el fin de reducir el error a la salida, ya que las imágenes a evaluar pueden tener intensidades por fuera de los rangos de entrenamiento.

La imagen que se analiza es una región de interés que no contempla el cambio de forma de la película durante la deformación por eso se ve el desplazamiento de material en la ROI.

La técnica de medición del espesor para la toma de datos de entrenamiento tiene impacto directo en la confiabilidad del sistema de aprendizaje, teniendo mayor precisión y menor área de contacto se puede asociar una cantidad menor de pixeles que representan el espesor.

## 4.10 Cuantificación de los cambios de intensidad

Briñez, Restrepo, & Branch, (2016) trabajaron en la cuantificación de los cambios de intensidad del color presentados en las imágenes de fotoelasticidad aplicado a un disco de acrílico sometido a compresión, en este experimento es aplicado a las imágenes de fotoelasticidad de la deformación con y sin carga térmica de la película plástica, ya que estas imágenes tienen información correspondiente a los cambios relacionados con el esfuerzo mostrados en cambios de intensidad del color, esta cuantificación entrega una imagen que representa la sumatoria de estos cambios de cada frame del video realizando una medición de distancia euclídea entre los canales R, G y B y sumando la diferencia entre la imagen de cada frame con la anterior imagen, esta técnica genera una matriz con las dimensiones de la imagen alojando el valor cuantificado de los cambios de intensidad, lo que se pretende con esto es identificar las región de mayor cambio durante la deformación (ver ecuación 3-24).

$$e_i = \sum_{i=1}^n \sqrt{(R_i - R_{i-1})^2 + (G_i - G_{i-1})^2 + (B_i - B_{i-1})^2} \quad (4-12)$$

En la Tabla 13 se muestran las imágenes resultantes de la cuantificación de las intensidades de los 20 videos tanto a T=20°C como a T=60°C, estas imágenes están escaladas con color como se puede ver en la Figura 4-41 donde azul representa el mínimo (82708) y el rojo el máximo (264325), con estas imágenes se quiere identificar las zonas de mayor cambio y que también está relacionado con la zona de mayor esfuerzo.

**Figura 4-41.** Mapa de color tipo escala de grises.

Fuente: *Elaboración Propia.*

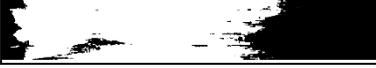
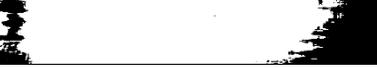
**Tabla 13.** Imágenes de cuantificación de los cambios de intensidad a T=20°C y T=60°C

No. Video	T=20°C	T=60°C
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		

Fuente: *Elaboración propia.*

En búsqueda de encontrar diferencias entre la deformación con y sin carga térmica se utiliza la segmentación de imágenes como una métrica de comparación, para este caso se establece un umbral del 70% con el fin de identificar cuál de los dos escenarios de temperatura presenta mayor área de cambios de intensidad (Ver Tabla 14). El cual se obtiene un promedio de las áreas en  $\text{píxeles}^2$  siendo la de mayor área (blanco) en las imágenes segmentadas de la termodeformación a 60°C.

**Tabla 14.** Área de segmentación de cuantificación de intensidad T=20°C y T=60°C

No. Video	T=20°C	Cant. pixeles	T=60°C	Cant. pixeles
1		170306		179423
2		171262		177377
3		167807		178472
4		173877		182538
5		167419		172006
6		133151		167368
7		153196		164712
8		156719		172437
9		139310		172218
10		136192		158025
<b>PROMEDIO PÍXELES BLANCOS</b>		<b>156923</b>	<b>PROMEDIO PÍXELES BLANCOS</b>	<b>172477</b>

Fuente: *Elaboración Propia.*

#### 4.10.1 Análisis

Las imágenes de la Tabla 13 a temperatura de 20°C muestra franjas de alta intensidad reflejando que esta región durante la deformación hubo el mayor cambio de las intensidades del color, por lo tanto se relaciona con mayor cambios de esfuerzos en esta zona.

En la zona cercana a las mordazas se genera una franja en forma de cabeza de flecha en las imágenes de deformación a temperatura ambiente, esto se debe a que el material sujetado en la mordaza no pierde dimensión pero la película se adelgaza en los tres ejes (largo, ancho y espesor) y las tensión de esta película se concentra en la franja revelada por este experimento. En las imágenes segmentadas se evidencia que la adición de temperatura a la película plástica genera una mayor distribución de los cambios a lo largo y ancho de esta de manera más homogénea.

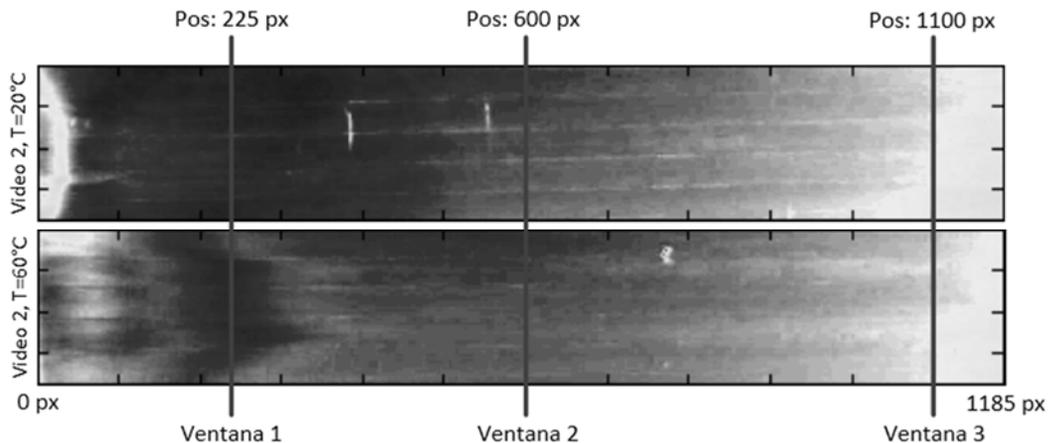
## 4.10.2 Conclusión

La imágenes de cuantificación de los cambios de intensidad revelan la distribución de los esfuerzos en la película plástica además se identifica que no es homogénea a lo largo de la película, pero en las imágenes de termodeformación esta distribución mejora su homogeneidad. Estas imágenes permiten ser relacionadas con las imágenes generadas anteriormente como son la de retado de fase y la de estimación del espesor con el fin de caracterizar las franjas de color.

## 4.11 Evolución del espesor estimado

Este experimento consiste en generar una única imagen de espesor estimado que representa el video a partir de una ventana (vector 188x1 pixeles) ubicada en una posición de interés, durante cada frame se apila este vector de izquierda a derecha, en la Figura 4-42 muestra las tres ventanas escogidas para los dos videos ( $T=20^{\circ}\text{C}$  y  $T=60^{\circ}\text{C}$ ), la ventana ubicada en el pixel 225 coincide con la mayor concentración de cambios de intensidad, la ventana 2 se encuentra en la región central donde la los cambios son más homogéneos y la tercera ventana es posicionada al final de la imagen donde los cambios son menores. El objetivo de este experimento es identificar cómo evoluciona el espesor durante el video.

**Figura 4-42.** Selección de ubicación de ventanas para evolución del espesor



*Fuente: Elaboración propia.*

En la Figura 4-44 muestra la imagen obtenida por la evolución del espesor en escala de grises de la ventana ubicada en la posición 225 del video 2 a temperatura de 20°C. Para la generación de la imagen se empleó la red neuronal entrenada en el subcapítulo 3.11.2, a su vez es graficada la evolución de espesor durante la deformación en la posición (94,225) como se puede apreciar en la Figura 4-45.

**Figura 4-43.** Espesor en escala de grises.



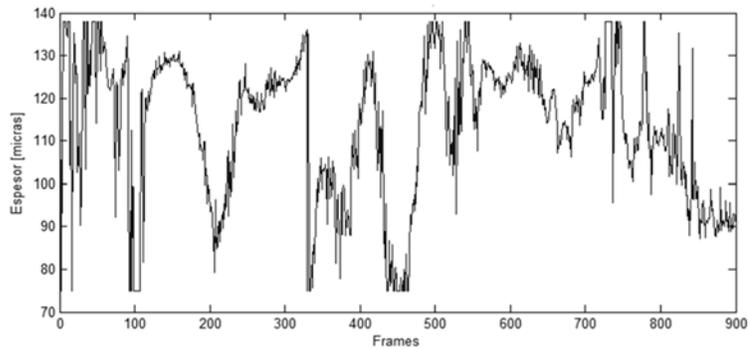
*Fuente: Elaboración propia.*

**Figura 4-44.** Mapa de evolución del espesor en escala de grises, posición: 225, video 2 y T=20°C



*Fuente: Elaboración propia en Matlab*

**Figura 4-45.** Evolución del espesor en el pixel (94,225), video 2, T=20°C



*Fuente: Elaboración propia en Matlab.*

Las imágenes de los siguientes ventanas se muestra en la Figura 4-46 el mapa de evolución del espesor de la posición 600 y en la Figura 4-48 el de la posición 1100 para el video 2 a temperatura de 20°C. También se muestra la curva de evolución del espesor del pixel intermedio para la posición 600 en la Figura 4-47 y para la posición 1100 en la

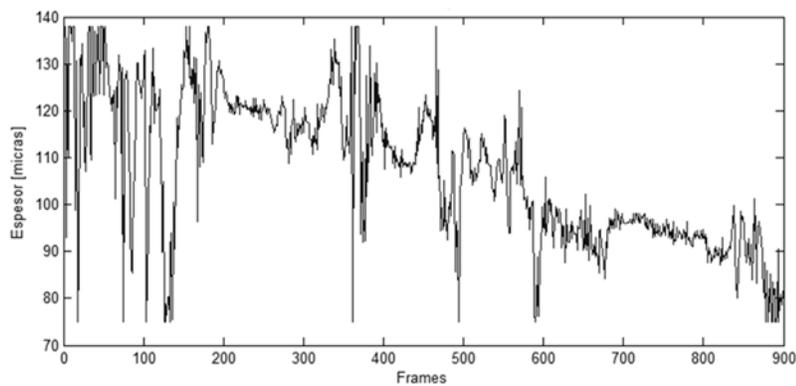
**Figura 4-49.**

**Figura 4-46.** Mapa de evolución del espesor en escala de grises, posición: 600, video 2 y  $T=20^{\circ}\text{C}$



Fuente: Elaboración propia en Matlab

**Figura 4-47.** Evolución del espesor en el pixel (94,600), video 2,  $T=20^{\circ}\text{C}$



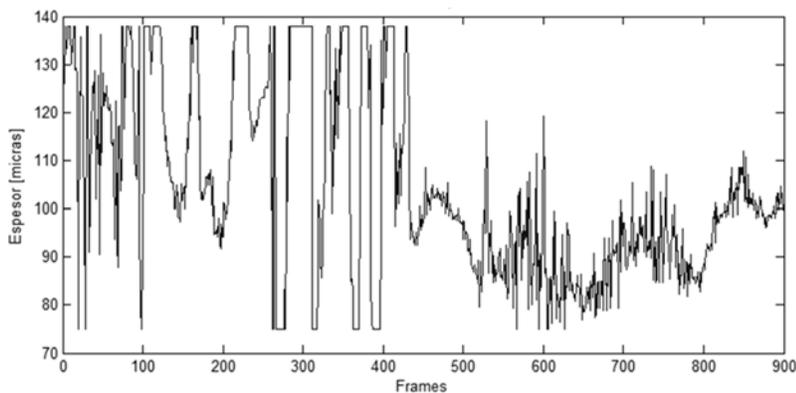
Fuente: Elaboración propia en Matlab

**Figura 4-48.** Mapa de evolución del espesor en escala de grises, posición: 1100, video 2 y  $T=20^{\circ}\text{C}$



Fuente: Elaboración propia en Matlab

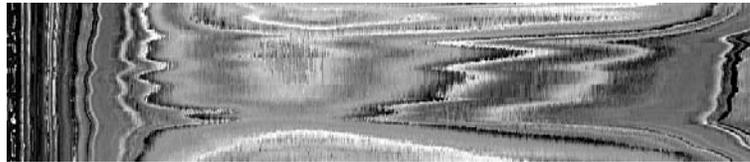
**Figura 4-49.** Evolución del espesor en el pixel (94,1100), video 2,  $T=20^{\circ}\text{C}$



*Fuente: Elaboración propia en Matlab*

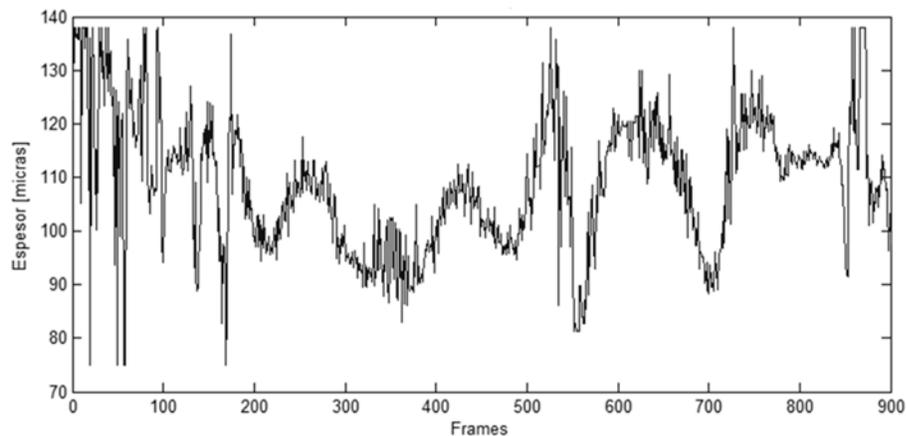
Para el video de termodeformación a  $T=60^{\circ}\text{C}$  se obtuvieron los mapas de evolución de espesor para las posiciones de 225, 600 y 1100 al igual que sus respectivas curvas de evolución de espesor del pixel intermedio en la Figura 4-50, Figura 4-51, Figura 4-52, Figura 4-53, Figura 4-54 y Figura 4-55 respectivamente.

**Figura 4-50.** Mapa de evolución del espesor en escala de grises, posición: 225, video 2 y  $T=60^{\circ}\text{C}$



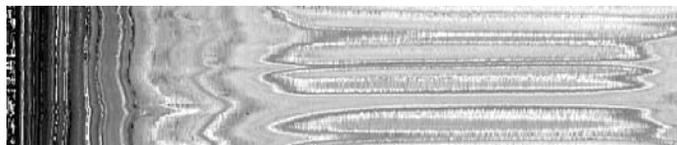
*Fuente: Elaboración propia en Matlab*

**Figura 4-51.** Evolución del espesor en el pixel (94,225), video 2,  $T=60^{\circ}\text{C}$

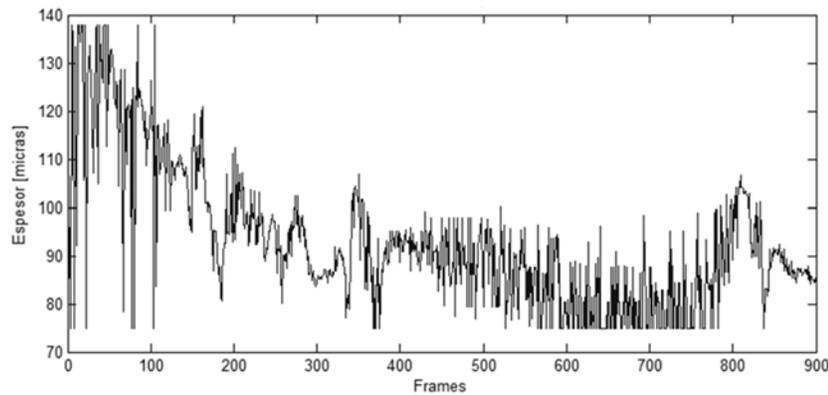


*Fuente: Elaboración propia en Matlab*

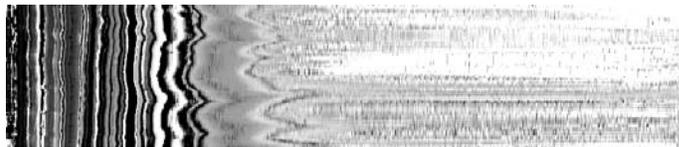
**Figura 4-52.** Mapa de evolución del espesor en escala de grises, posición: 600, video 2 y  $T=60^{\circ}\text{C}$



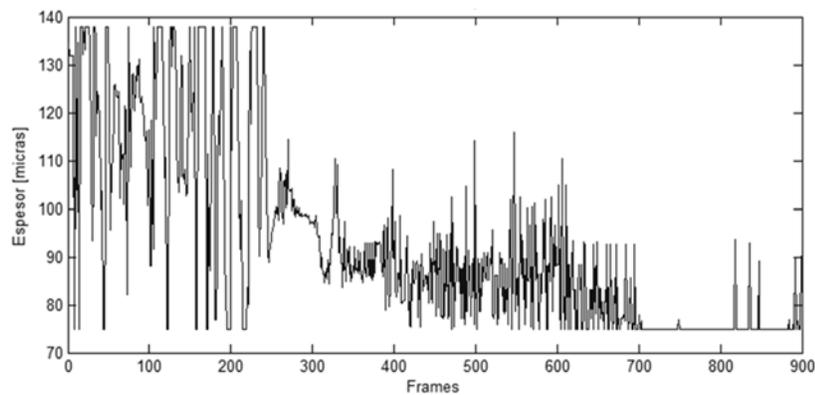
*Fuente: Elaboración propia en Matlab*

**Figura 4-53.** Evolución del espesor en el pixel (94,600), video 2,  $T=60^{\circ}\text{C}$ 

Fuente: Elaboración propia en Matlab

**Figura 4-54.** Mapa de evolución del espesor en escala de grises, posición: 1100, video 2 y  $T=60^{\circ}\text{C}$ 

Fuente: Elaboración propia en Matlab

**Figura 4-55.** Evolución del espesor en el pixel (94,1100), video 2,  $T=60^{\circ}\text{C}$ 

Fuente: Elaboración propia en Matlab

### 4.11.1 Análisis

En el subcapítulo anterior se observó regiones de mayores cambios de intensidad y que estos cambios están directamente relacionados con el cambio de esfuerzos y de espesor, por lo tanto con el fin de demostrar el análisis, se seleccionan tres puntos para realizar el mapa de evolución del espesor. Estos arrojaron un resultado esperado, ya que el material dentro de la región de interés ROI se desplaza y en la zona cercana a la mordaza se presenta una franja de alta intensidad generando cambios de espesor en poco tiempo (ver Figura 4-45 y Figura 4-51), las curvas presentan más de ocho fluctuaciones evidenciando así que el material que pasa por zona 225 esta deformada en zonas diferentes al de la ventana.

En la ventana de la posición 600 el espesor converge decrecientemente, pues el material que va pasando por esta ventana ya ha sido deformado en la zona cercana a las mordazas. Y en la posición 1100 también se presenta la reducción del espesor pero también se puede notar que hay alta fluctuación en pocos frames, esto puede ser por la falta de precisión del modelo ANFIS que evalúa la imagen.

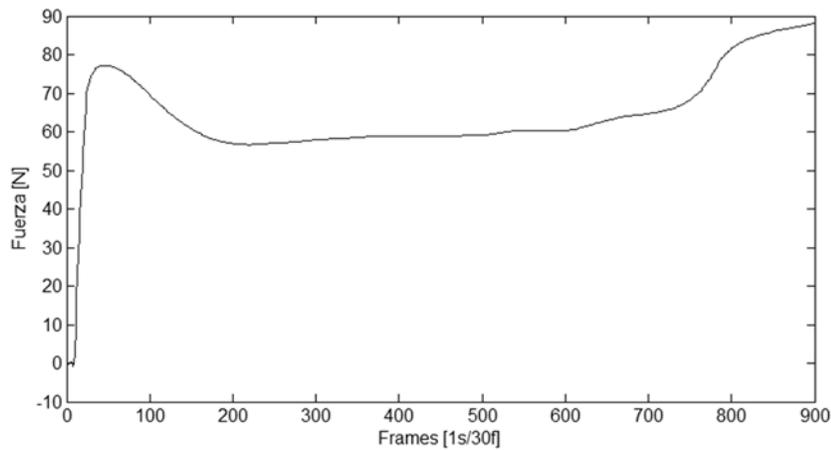
### 4.11.2 Conclusión

Sobre este experimento se concluye que la variación del espesor no es uniforme en la película plástica durante la deformación, pero si se evidencia que el espesor se reduce a medida que se desplaza el material sobre la ROI y se puede ver en las curvas de evolución del espesor en la ubicación de los pixeles escogidos coinciden en que todas convergen a un espesor menor.

## 4.12 Generación de mapa de esfuerzos

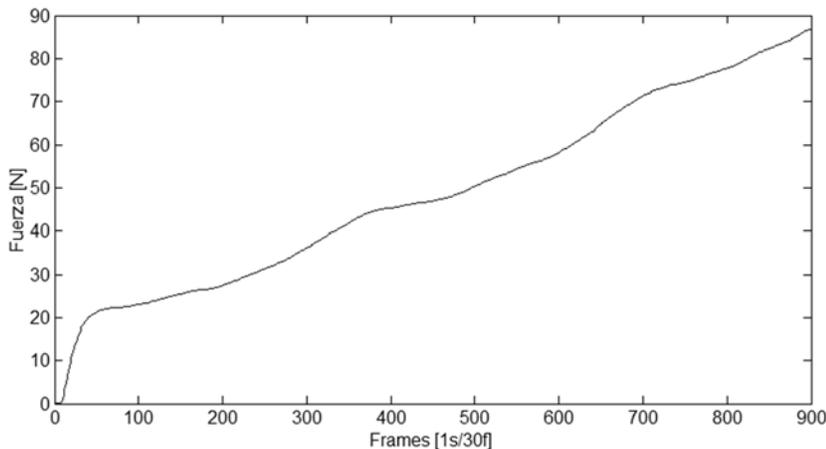
Uno de los objetivos de este trabajo es “Caracterizar zonas de esfuerzos determinadas por franjas de color en el mapa de esfuerzos” y se ha venido desarrollando en este capítulo experimental. Luego de obtener las imágenes de espesor se realiza una transformación a una imagen de esfuerzos estimados, para ello es necesario obtener la fuerza aplicada a la PPMC en términos de frames, tal como se puede apreciar en las Figura 4-56 y Figura 4-57 que para cada frame le corresponde una Fuerza.

**Figura 4-56.** Curva Fuerza vs Frames a  $T=20^{\circ}\text{C}$



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 4-57.** Curva Fuerza vs Frames a  $T=60^{\circ}\text{C}$



Fuente: Elaboración propia.

En la ecuación 3-25 se muestra como hallar el esfuerzo “ $\sigma$ ” y es necesario conocer el área de la sección transversal a la dirección de la deformación, el área está dado por el espesor “ $t$ ” (valores de las imágenes de espesor) y el ancho “ $w$ ” pero el ancho está determinado por  $OSR=0.000053$  [m/pixel] (resolución espacial del objeto ver ecuación 3-12) y el ancho “ $a$ ” en pixeles debido a que las unidades del área es en metros cuadrados.

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{t*w} = \frac{F}{t*a*OSR} = \frac{F[N]}{t[m]*188[pix]*0.000053[\frac{m}{pix}]} \tag{4-13}$$

$$\sigma = \frac{F}{t*0.009964[m]} \tag{4-14}$$

$$\sigma = \frac{F}{t} * 100.361[1/m] \tag{4-15}$$

Aplicada la formula a las imágenes de espesor se generan las imágenes de esfuerzo que puede apreciar en la

Tabla 15 y 16, estas han sido escalada por color como se muestra en la barra de la Figura 4-58.

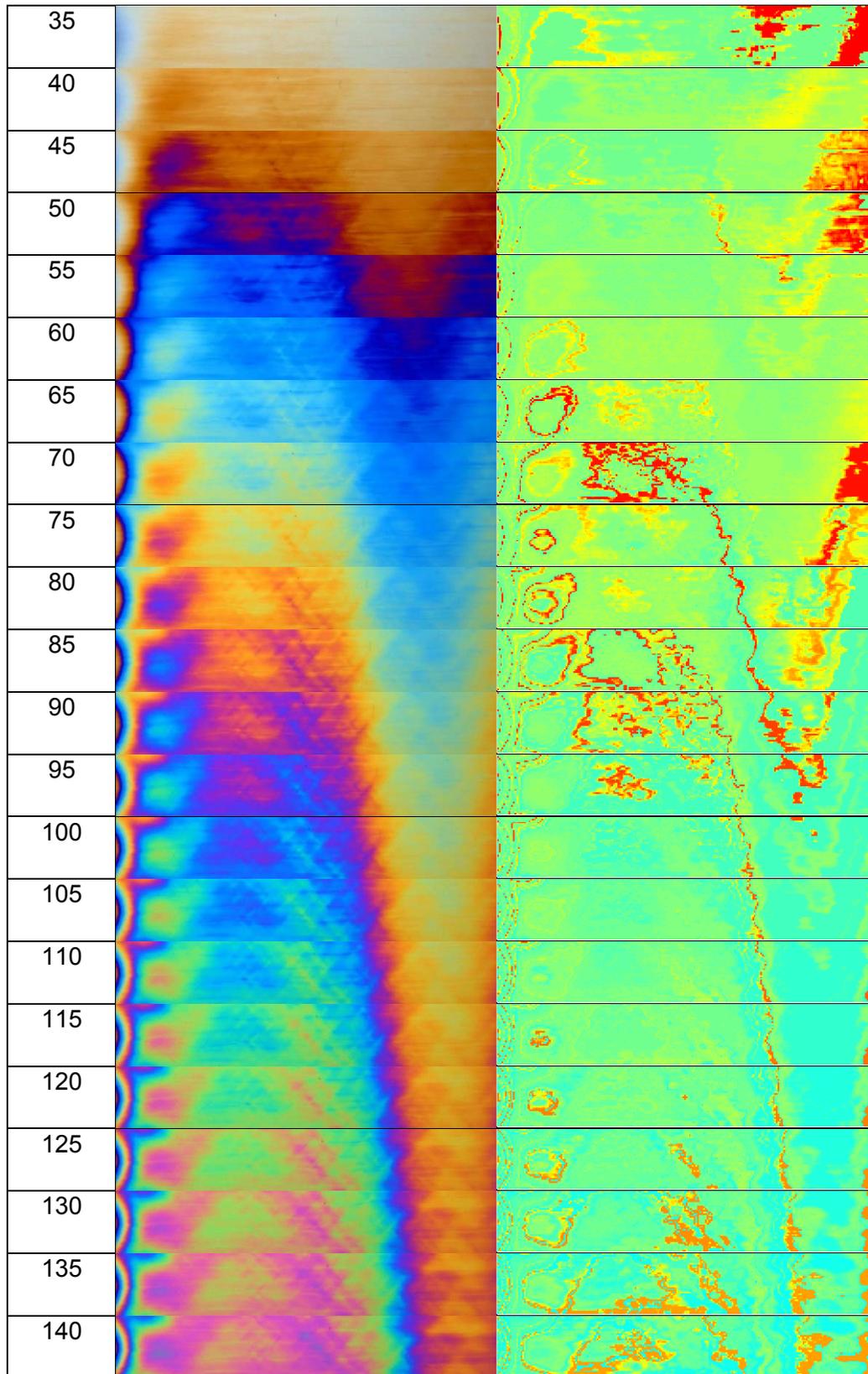
**Figura 4-58.** Colores escalados tipo “jet” de Matlab

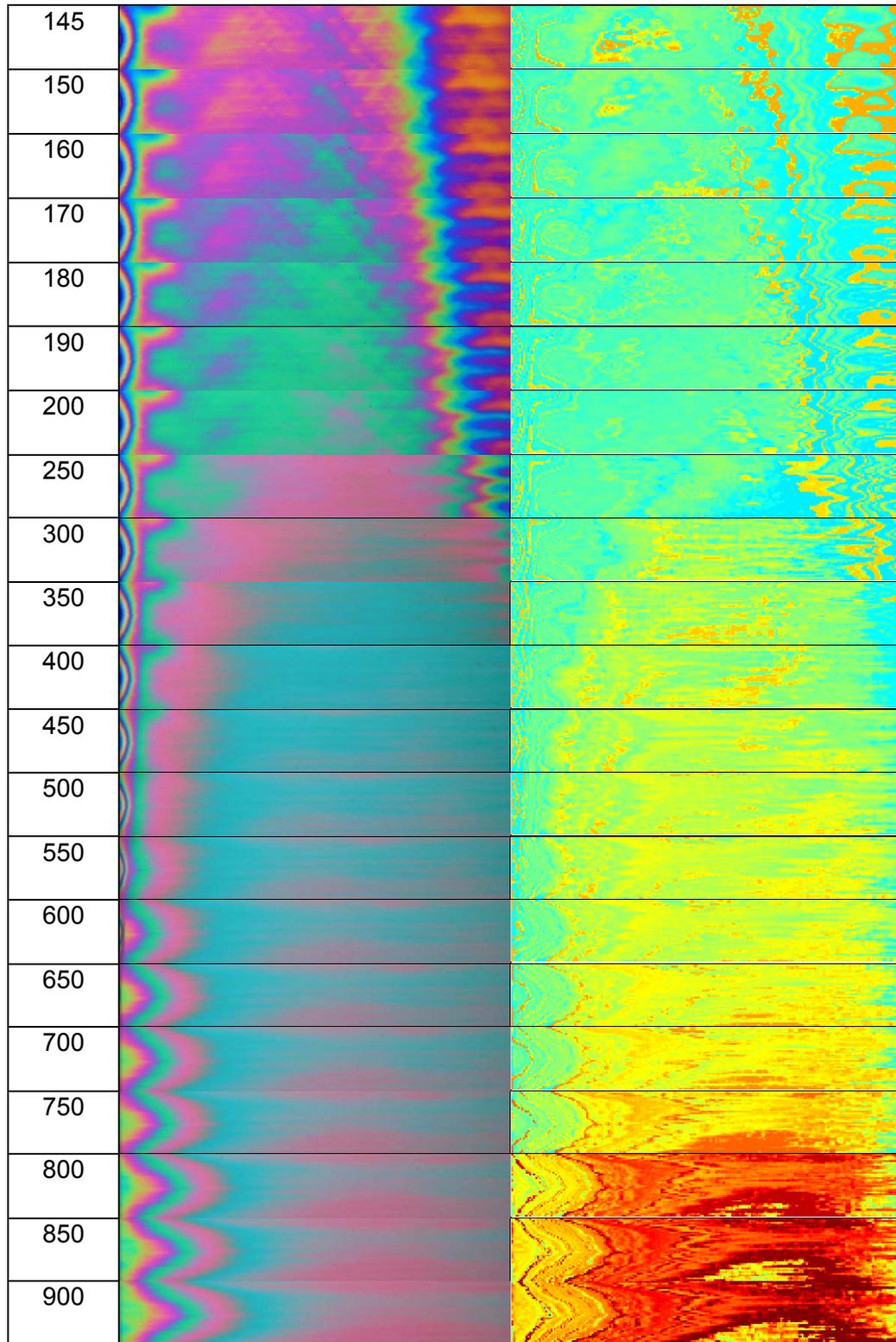


Fuente: Elaboración propia en Matlab.

**Tabla 15.** Imágenes reales de deformación a T=20°C e Imagen de esfuerzo

Frame	Imagen Real	Imagen Esfuerzo
10		
15		
20		
25		
30		

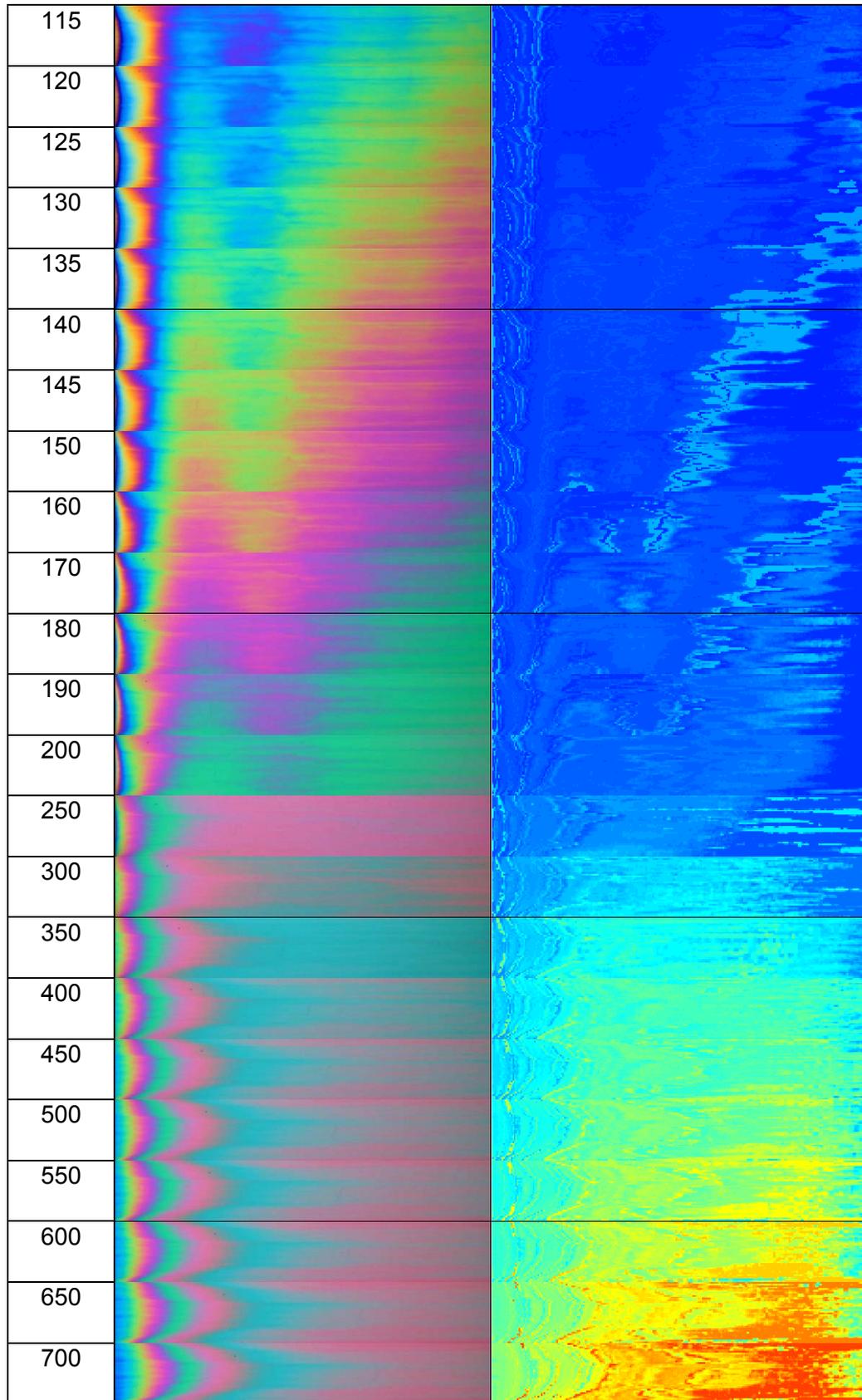


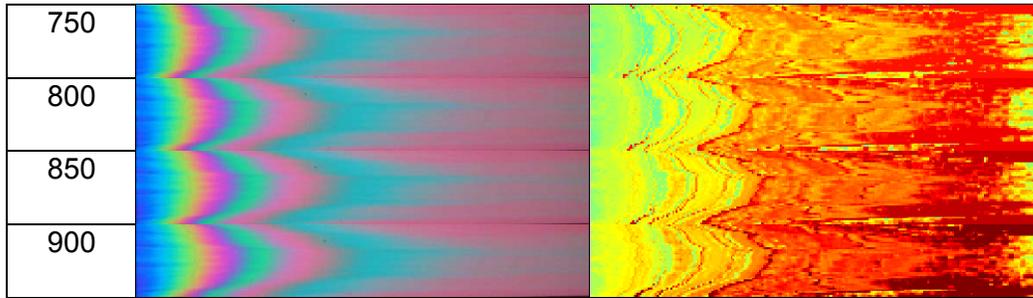


Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 16.** Imágenes reales de deformación a  $T=60^{\circ}\text{C}$  e Imagen de esfuerzo

Frame	Imagen Real $T=60^{\circ}\text{C}$	Imagen Esfuerzo
10		
15		
20		
25		
30		
35		
40		
45		
50		
55		
60		
65		
70		
75		
80		
85		
90		
95		
100		
105		
110		





Fuente: *Elaboración propia.*

### 4.12.1 Análisis

En las tablas 14 y 15 se muestran las imágenes de esfuerzos revelando el comportamiento dinámico de zonas de esfuerzos en la película plástica, partiendo de la curva de fuerza vs frames teniendo para cada frame un valor de fuerza, por lo tanto la imagen obtenida no solamente cambia los patrones de franjas de espesor sino también la intensidad de estos debido al factor de la fuerza involucrado que es única para cada frame.

Se considera que la deformación es uniforme en la línea transversal a la dirección de la fuerza el cual esa suposición es demasiado estricta, pues la fuerza de deformación afecta por zonas a la película, pero lo que no cambia son los patrones de franjas que se presentan por los cambios de espesor y este es una resultante de la fuerza de deformación.

Al comparar por observación se puede ver que las imágenes de esfuerzos en temperatura a 20°C contra la de 60°C hay diferencias en los valores de esfuerzos debido a que la curva de fuerza vs frames (60°C) tiene una zona elástica menor, por tal razón la imágenes tiene tonalidades más bajas. Esta diferencia no se ve tan marcada en las imágenes de espesor y los colores de interferencia son únicos y el mapa de esfuerzos son diferentes bajo las dos condiciones a manera de hipótesis las condiciones de temperatura juega un papel importante en la distribución de esfuerzos y la imágenes deben ser tratadas de manera independiente al de otras condiciones ya que los colores describen o determinan la diferencia de esfuerzos mas no el esfuerzo como unidad de medición de presión.

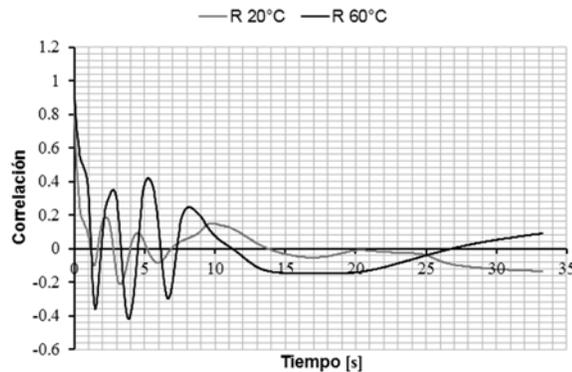
### 4.12.2 Conclusión

Las imágenes de esfuerzos a  $T=20^{\circ}\text{C}$  y  $T=60^{\circ}\text{C}$  son diferentes para un mismo color de interferencia y esto obedece a la modificación de las condiciones mecánicas del material al momento de aplicar calor a la PPMC, ella tiene un comportamiento a la deformación distinto y por ende valores de esfuerzo diferentes a pesar de tener patrones de colores de interferencia similares con respecto a la deformación a temperatura ambiente. La ley del esfuerzo óptico relaciona la diferencia de esfuerzos principales con el retardo de fase, la longitud de onda de la iluminación, el espesor y la constante de esfuerzo-óptico, por lo tanto se puede decir que al aumentar el valor de la constante del esfuerzo-óptico y las demás variables se conservan, el esfuerzo disminuiría y el color se conservaría. La constante de esfuerzo-óptico de los materiales plásticos es susceptible al aumento de temperatura.

### 4.13 Evaluación de imágenes

Debido a la gran cantidad de imágenes del video, se seleccionan nueve (9) imágenes para realizar la comparación a escala real, estas nueve imágenes corresponden a los cruces por cero de la curva de correlación del canal rojo de las imágenes de la deformación a  $T=20^{\circ}\text{C}$  (ver Figura 4-59).

**Figura 4-59.** Gráfica de correlación del canal rojo para deformación a  $20^{\circ}\text{C}$  y  $60^{\circ}\text{C}$  en video #9



Fuente: Elaboración propia.

Los cruces por cero son 1.13s, 1.7s, 2.77s, 4.0s, 5.2s, 6.93s, 13.77s, 20.0s y 25.0s (este último por cruce entre curvas) y los imágenes (*frames*) son 34, 51, 83, 120, 156, 210, 413, 600 y 750 respectivamente se pueden ver en la Tabla 17.

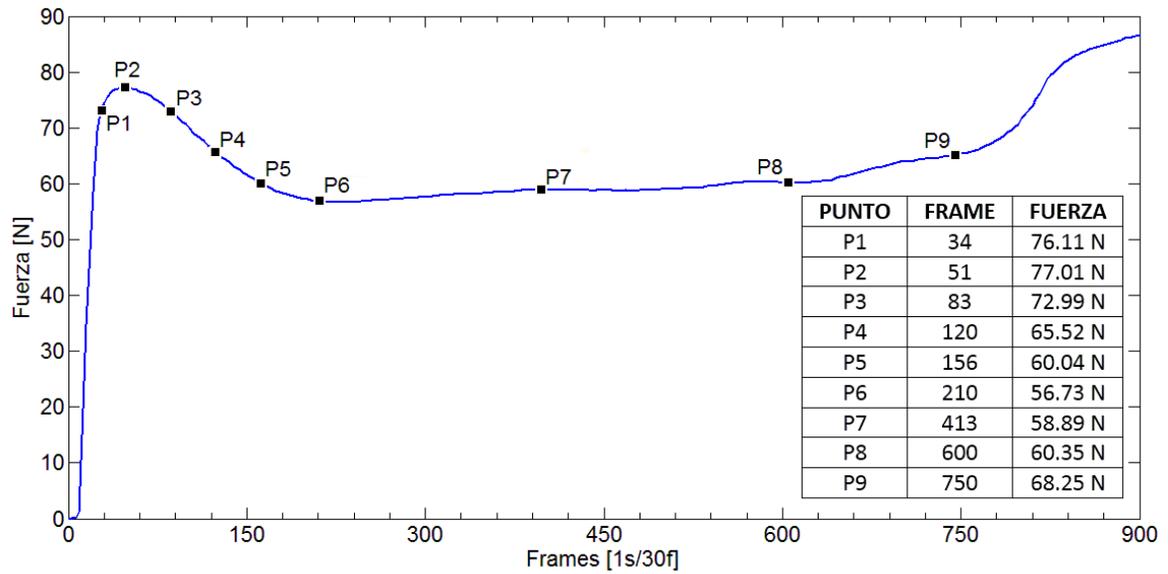
**Tabla 17.** Imágenes reales de frames seleccionados cruce por cero T=20°C y T=60°C

Frame	Imagen a T=20°C	Imagen a T=60°C
34		
51		
83		
120		
156		
210		
413		
600		
750		

Fuente: Elaboración propia.

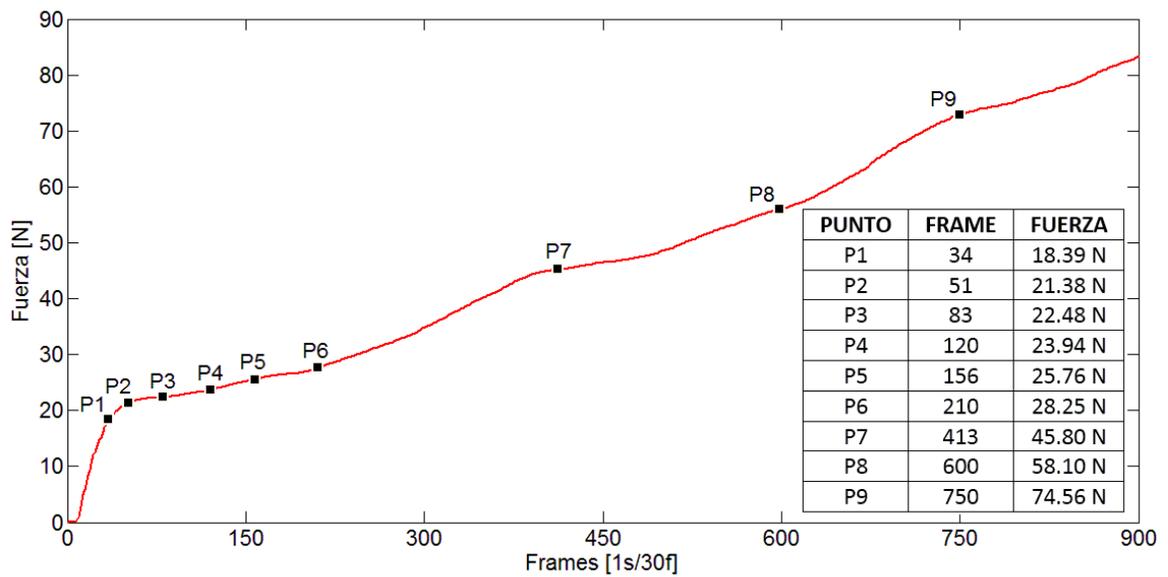
A cada imagen de cruce por cero se toma la posición (frame) el cual dentro de la curva de Fuerza vs Frames se determina la fuerza aplicada en el instante correspondiente al frame a evaluar, la Figura 4-60 se muestra los valores de fuerza para las posiciones de la deformación a 20°C y el la Figura 4-61 la de 60°C

**Figura 4-60.** Valores de fuerza de la posiciones seleccionadas a T=20°C



Fuente: Elaboración propia.

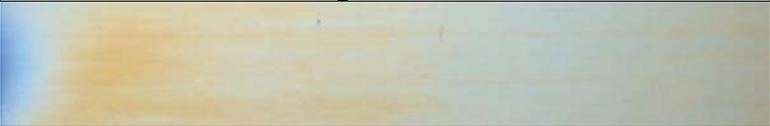
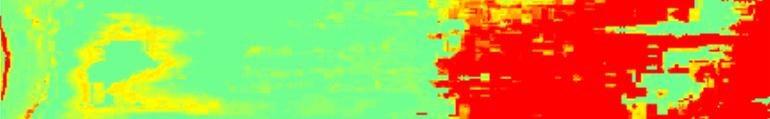
**Figura 4-61.** Valores de fuerza de la posiciones seleccionadas a T=60°C



Fuente: Elaboración propia.

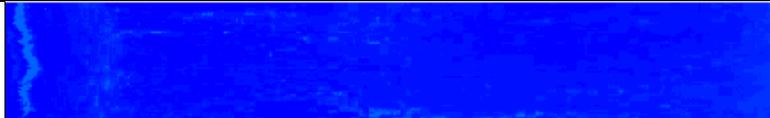
El objetivo de este subcapítulo es mostrar las tres imágenes generadas a partir de una imagen real adquirida en los videos, los cuales son la imagen de retardo, de espesor y de esfuerzo, esto con el fin de identificar relaciones entre ellas.

**Tabla 18.** Imágenes real frame 34, T=20°C, imagen de retardo, espesor y esfuerzo

Tipo de Imagen	Imagen T=20°C
<b>Imagen RGB</b> Frame=34 T=20°C	
<b>Retardo</b> Blanco=0nm Negro=3000nm	
<b>Espesor</b> Negro=138µm Blanco=75µm	
<b>Esfuerzo</b> Max: 101.84 MPa Min: 55.35 MPa F= 76.11N	

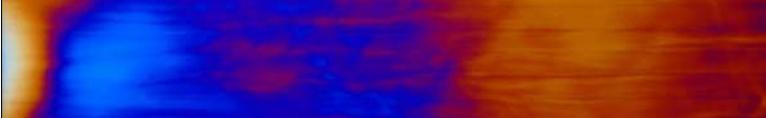
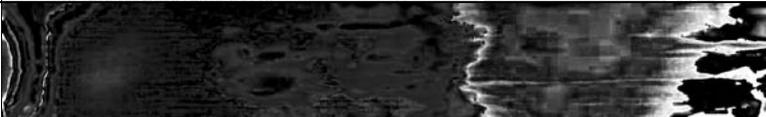
Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 19.** Imágenes real frame 34, T=60°C, imagen de retardo, espesor y esfuerzo

Tipo de Imagen	Imagen T=60°C
<b>Imagen RGB</b> Frame=34 T=60°C	
<b>Retardo</b> Blanco=0nm Negro=3000nm	
<b>Espesor</b> Negro=138µm Blanco=75µm	
<b>Esfuerzo</b> Max: 24.6 MPa Min: 13.37 MPa F= 18.38N	

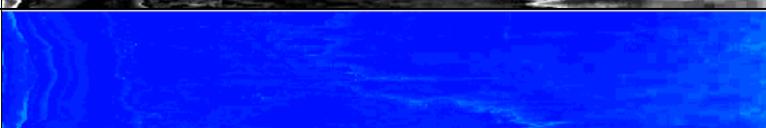
Fuente: *Elaboración propia.*

**Tabla 20.** Imágenes real frame 51, T=20°C, imagen de retardo, espesor y esfuerzo

Tipo de Imagen	Imagen T=20°C
<b>Imagen RGB</b> Frame=51 T=20°C	
<b>Retardo</b> Blanco=0nm Negro=3000nm	
<b>Espesor</b> Negro=138µm Blanco=75µm	
<b>Esfuerzo</b> Max: 103.5 MPa Min: 56.00 MPa F= 77.01 N	

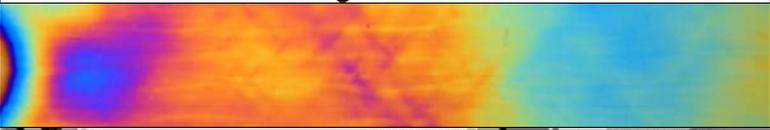
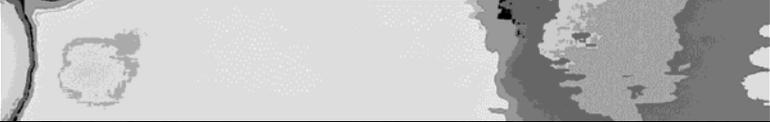
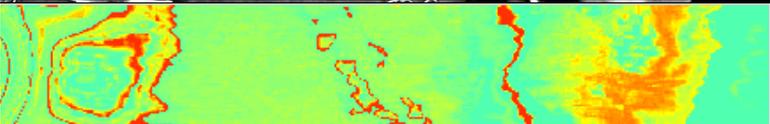
Fuente: *Elaboración propia.*

**Tabla 21.** Imágenes real frame 51, T=60°C, imagen de retardo, espesor y esfuerzo

Tipo de Imagen	Imagen T=60°C
<b>Imagen RGB</b> Frame=51 T=60°C	
<b>Retardo</b> Blanco=0nm Negro=3000nm	
<b>Espesor</b> Negro=138µm Blanco=75µm	
<b>Esfuerzo</b> Max: 28.61MPa Min: 15.55 MPa F= 21.38 N	

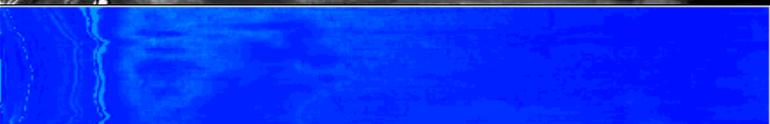
Fuente: *Elaboración propia.*

**Tabla 22.** Imágenes real frame 83, T=20°C, imagen de retardo, espesor y esfuerzo

Tipo de Imagen	Imagen T=20°C
<b>Imagen RGB</b> Frame=83 T=20°C	
<b>Retardo</b> Blanco=0nm Negro=3000nm	
<b>Espesor</b> Negro=138µm Blanco=75µm	
<b>Esfuerzo</b> Max: 97.67 MPa Min: 53.08 MPa F= 72.99 N	

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 23.** Imágenes real frame 83, T=60°C, imagen de retardo, espesor y esfuerzo

Tipo de Imagen	Imagen T=60°C
<b>Imagen RGB</b> Frame=83 T=60°C	
<b>Retardo</b> Blanco=0nm Negro=3000nm	
<b>Espesor</b> Negro=138µm Blanco=75µm	
<b>Esfuerzo</b> Max: 30.08 MPa Min: 16.35 MPa F= 22.48 N	

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 24.** Imágenes real frame 120, T=20°C, imagen de retardo, espesor y esfuerzo

Tipo de Imagen	Imagen T=20°C
<b>Imagen RGB</b> Frame=120 T=20°C	
<b>Retardo</b> Blanco=0nm Negro=3000nm	
<b>Espesor</b> Negro=138µm Blanco=75µm	
<b>Esfuerzo</b> Max: 87.67 MPa Min: 47.65 MPa F= 65.52 N	

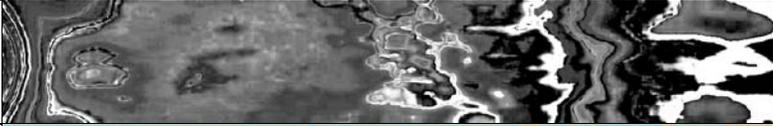
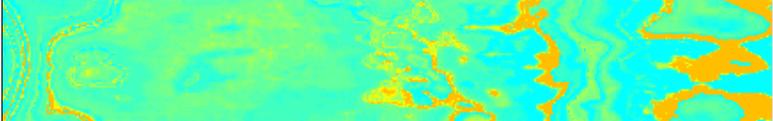
Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 25.** Imágenes real frame 120, T=60°C, imagen de retardo, espesor y esfuerzo

Tipo de Imagen	Imagen T=60°C
<b>Imagen RGB</b> Frame=120 T=60°C	
<b>Retardo</b> Blanco=0nm Negro=3000nm	
<b>Espesor</b> Negro=138µm Blanco=75µm	
<b>Esfuerzo</b> Max: 32.04 MPa Min: 17.41 MPa F= 23.94 N	

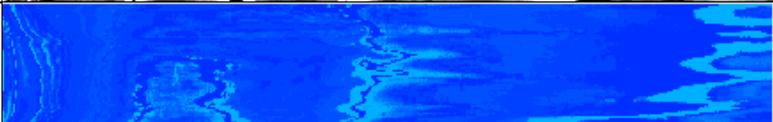
Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 26.** Imágenes real frame 156, T=20°C, imagen de retardo, espesor y esfuerzo

Tipo de Imagen	Imagen T=20°C
<b>Imagen RGB</b> Frame=156 T=20°C	
<b>Retardo</b> Blanco=0nm Negro=3000nm	
<b>Espesor</b> Negro=138µm Blanco=75µm	
<b>Esfuerzo</b> Max: 80.34 MPa Min: 43.66 MPa F= 60.04 N	

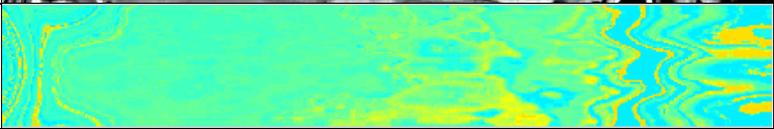
Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 27.** Imágenes real frame 156, T=60°C, imagen de retardo, espesor y esfuerzo

Tipo de Imagen	Imagen T=60°C
<b>Imagen RGB</b> Frame=156 T=60°C	
<b>Retardo</b> Blanco=0nm Negro=3000nm	
<b>Espesor</b> Negro=138µm Blanco=75µm	
<b>Esfuerzo</b> Max: 34.46 MPa Min: 18.73 MPa F= 25.75 N	

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 28.** Imágenes real frame 210, T=20°C, imagen de retardo, espesor y esfuerzo

Tipo de Imagen	Imagen T=20°C
<b>Imagen RGB</b> Frame=210 T=20°C	
<b>Retardo</b> Blanco=0nm Negro=3000nm	
<b>Espesor</b> Negro=138µm Blanco=75µm	
<b>Esfuerzo</b> Max: 75.91 MPa Min: 41.26 MPa F= 56.73 N	

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 29.** Imágenes real frame 210, T=60°C, imagen de retardo, espesor y esfuerzo

Tipo de Imagen	Imagen T=60°C
<b>Imagen RGB</b> Frame=210 T=60°C	
<b>Retardo</b> Blanco=0nm Negro=3000nm	
<b>Espesor</b> Negro=138µm Blanco=75µm	



Fuente: *Elaboración propia.*

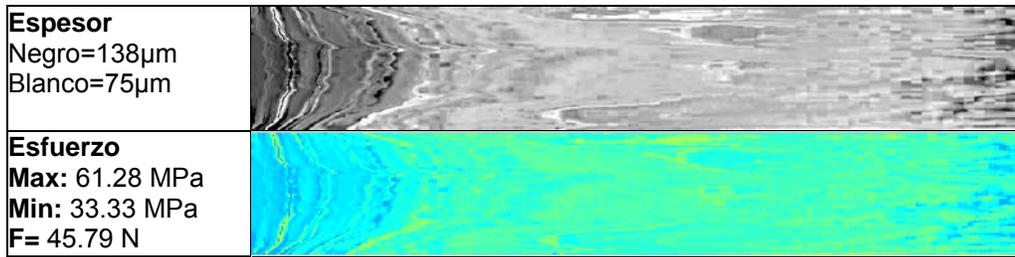
**Tabla 30.** Imágenes real frame 413, T=20°C, imagen de retardo, espesor y esfuerzo

Tipo de Imagen	Imagen T=20°C
<b>Imagen RGB</b> Frame=413 T=20°C	
<b>Retardo</b> Blanco=0nm Negro=3000nm	
<b>Espesor</b> Negro=138µm Blanco=75µm	
<b>Esfuerzo</b> <b>Max:</b> 78.80 MPa <b>Min:</b> 42.82 MPa <b>F=</b> 58.89 N	

Fuente: *Elaboración propia.*

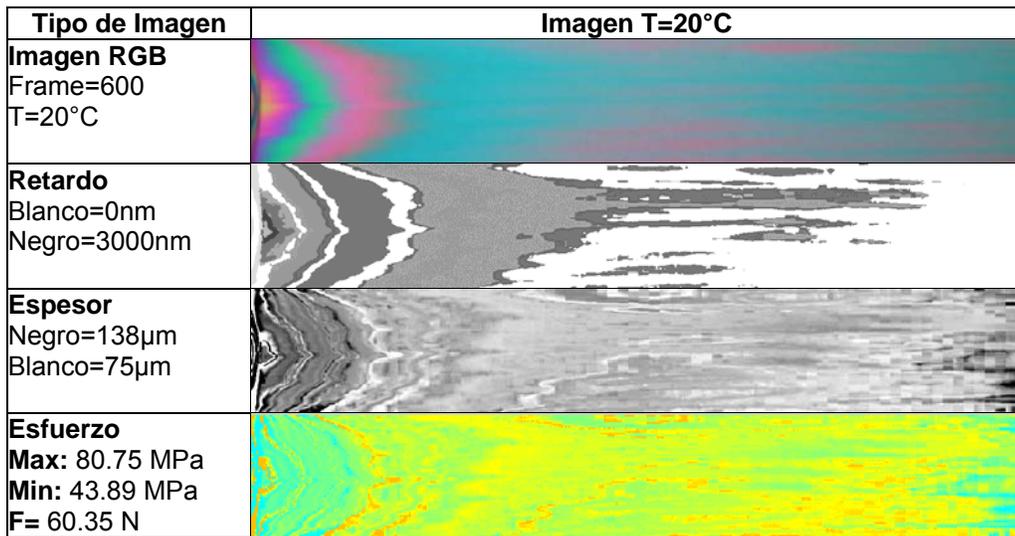
**Tabla 31.** Imágenes real frame 413, T=60°C, imagen de retardo, espesor y esfuerzo

Tipo de Imagen	Imagen T=60°C
<b>Imagen RGB</b> Frame=413 T=60°C	
<b>Retardo</b> Blanco=0nm Negro=3000nm	



Fuente: Elaboración propia.

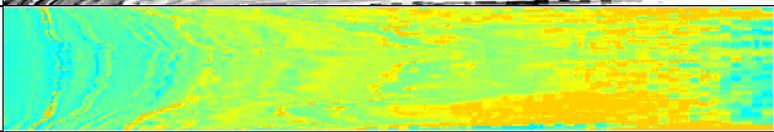
**Tabla 32.** Imágenes real frame 600, T=20°C, imagen de retardo, espesor y esfuerzo



Fuente: Elaboración propia.

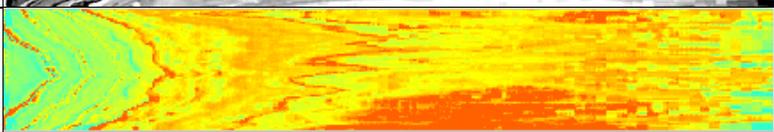
**Tabla 33.** Imágenes real frame 600, T=60°C, imagen de retardo, espesor y esfuerzo



<b>Retardo</b> Blanco=0nm Negro=3000nm	
<b>Espesor</b> Negro=138µm Blanco=75µm	
<b>Esfuerzo</b> Max: 77.74 MPa Min: 42.25 MPa F= 58.09 N	

Fuente: Elaboración propia.

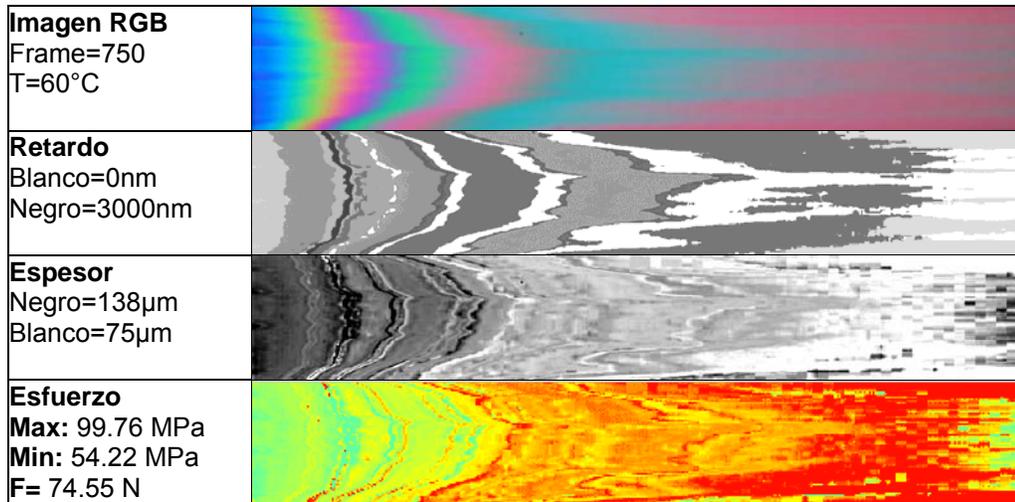
**Tabla 34.** Imágenes real frame 750, T=20°C, imagen de retardo, espesor y esfuerzo

Tipo de Imagen	Imagen T=20°C
<b>Imagen RGB</b> Frame=750 T=20°C	
<b>Retardo</b> Blanco=0nm Negro=3000nm	
<b>Espesor</b> Negro=138µm Blanco=75µm	
<b>Esfuerzo</b> Max: 91.32 MPa Min: 49,63 MPa F= 68.25 N	

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 35.** Imágenes real frame 750, T=60°C, imagen de retardo, espesor y esfuerzo

Tipo de Imagen	Imagen T=60°C
----------------	---------------



Fuente: Elaboración propia.

### 4.13.1 Análisis

Las imágenes reales mostradas en las tablas 17 a la 34 representan diferentes momentos de la deformación tomando como tiempo de referencia 900 frames, los mayores cambios asociados a la intensidad de color se ubican en los primeros 300 frames del video que corresponden a 10 segundos y a partir del frame 300 hasta el 900 los cambios son lentos y el orden es mayor. Entonces de los 9 puntos seleccionados los primeros 6 están dentro de la zona de mayor cambio de intensidad y cambios de orden. Cabe resaltar que las imágenes de retardo fueron generadas por demodulación del color a partir de los colores de interferencia en la imagen sintética que está directamente relacionada con el valor del retardo de fase, la imagen de espesor fue generada por una red neuronal tipo ANFIS a partir de un conjunto de datos medidos físicamente y relacionados con el color de las imágenes adquiridas y la imagen de esfuerzo es una transformación de la imagen de espesor enmarcada por la fuerza aplicada en la deformación. En síntesis la imagen de retardo y la imagen de espesor fueron generadas con técnicas diferentes que no tienen relación alguna pero que revelan un patrón de franjas que hablan de las características de la película plástica.

En la Tabla 18 que corresponde al frame 34 muestra una imagen de retardo que no tiene sentido si observamos que el color negro representa un retardo de 3000nm y el frame 34 corresponde a un segundo de la deformación y su retardo de fase está en el primer orden,

esto se debe a la estrategia de demodulación empleada que permite asignar un color de orden mayor a uno que se encuentra en un orden menor, este problema o error en la asignación del color se presenta en las imágenes iniciales del primer orden y las de 4 y quinto orden. También en la asignación del espesor se tiene problemas en las imágenes iniciales debido a que la red neuronal fue entrenada con colores y espesores medidos físicamente y los colores de la fotoelasticidad presenta cambios muy rápidos y pudo haberse obviado colores que representan el primer orden. A pesar de los errores lo que no cambia son los patrones generados por la deformación del material en este sentido si hay una relación entre la imagen de retardo y la de espesor basados en las franjas mostradas.

En la **Tabla 36** se muestra los valores máximos y mínimos de esfuerzo para cada frame y la fuerza aplicada en este instante de tiempo. Los valores máximos muestran que la película plástica en el proceso de termodeformación alcanza un máximo a los 750 frames (25 segundos) y en la zona de mayor cambio solo se obtuvo un máximo de 61.28MPa, esto indica que la película al ser termodeformada presenta menos esfuerzo que al ser deformada sin carga térmica.

**Tabla 36.** Máximo y mínimo esfuerzo de frames seleccionados.

Frame	Deformación a T=20°C			Deformación a T=60°C		
	Fuerza [N]	Máximo Esfuerzo [MPa]	Mínimo Esfuerzo [MPa]	Fuerza [N]	Máximo Esfuerzo [MPa]	Mínimo Esfuerzo [MPa]
34	76.11	101.84	55.35	18.38	24.6	13.37
51	77.01	103.05	56.00	21.38	28.61	15.55
83	72.99	97.67	53.08	22.48	30.08	16.35
120	65.52	87.67	47.65	23.94	32.04	17.41
156	60.04	80.34	43.66	25.75	34.46	18.73
210	56.73	75.91	41.26	28.25	37.8	20.55
413	58.89	78.8	42.82	45.79	61.28	33.33
600	60.35	80.75	43.89	58.09	77.74	42.25
750	68.25	90.32	49.63	74.55	99.76	54.22

■ Máximo

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.13.2 Conclusión

---

El patrón de franjas está asociada a los cambios de intensidad, retardo de fase, espesor y esfuerzo.

La película plástica multicapa al ser deformada con carga térmica presenta menos esfuerzo mecánico; en la ecuación 2-4 se tiene que la diferencia de esfuerzos es igual al retardo de fase sobre el producto del espesor y el coeficiente fotoelástico del material, por lo tanto si tenemos las imágenes de retardo y la de espesores pero los esfuerzos son diferentes significa que la carga térmica afecta directamente el coeficiente fotoelástico de la película.



## 5. Conclusiones y recomendaciones

### 5.1 Conclusiones

Los experimentos fueron basados en el análisis de las imágenes de fotoelasticidad adquiridas por un montaje de polariscopio plano, usado como herramienta de visualización y cuantificación de los cambios de esfuerzos; para determinar el orden de las franjas de colores de interferencia y la comprensión de la relación entre el orden, los esfuerzos y el espesor de la película plástica multicapa durante el proceso de termodeformación. Para ello se propuso una metodología que usó la demodulación de color y aprendizaje del espesor a través de los colores de interferencia con el fin de identificar el comportamiento de los cambios presentados en la PPMC tanto ópticas como mecánicas, lo que nos conlleva a las siguientes conclusiones:

Dentro de la caracterización del montaje para la adquisición de imágenes de fotoelasticidad en el proceso de termodeformación se determinó que la precisión en las intensidades del color afectan de manera directa los resultados, pues la calibración del color es el factor más importante que conlleva a una buena demodulación de la imagen ya que esta se realiza bajo la comparación de cada canal con la imagen sintética buscando el menor error cuadrático por distancia euclídea. El montaje también arroja información de la fuerza aplicada a la película durante el proceso, generando una curva de fuerza vs deformación y su sincronismo con la adquisición de las imágenes impacta sobre la generación de la imagen de esfuerzos ya que se utiliza el valor de la fuerza en el tiempo (frame) para el cálculo del esfuerzo de ese instante.

Al comparar la deformación a temperatura ambiente contra la deformación con carga térmica, la película se lleva a una temperatura de 60°C el cual esta adición de calor permite

la deformación con menor fuerza aplicada y también afecta el tiempo de ruptura debido a la concentración de esfuerzos que se focaliza en el área de calentamiento.

Al correlacionar las imágenes adquiridas de la termodeformación se concluye que el coeficiente de similitud es convergente a un valor de correlación bajo en menor tiempo en comparación a la deformación sin carga térmica, lo cual indica que existen cambios en la aparición de los colores de interferencia asociados al aumento de la temperatura en la película plástica durante la deformación y estos colores representan la diferencia de esfuerzo que están relacionados con el espesor. Se puede decir que por la distribución de las franjas de color se evidencia que el estiramiento de la película es irregular en la región de interés y a través del análisis de evolución de intensidades se mostró que el comportamiento de los esfuerzos mecánicos es diferente en cada zona de la película plástica. Por ejemplo, en la zona cercana a la mordaza el material sujetado no cambia de forma y la tensión de los bordes de la película forman una línea de tensión convergente al centro de la película, por el contrario en el centro de la región de interés el comportamiento de las franjas es más homogéneo. La correlación de las imágenes muestra también los cambios de orden presentados durante la deformación, y se puede afirmar que a partir del cuarto orden la deformación continúa pero los cambios en los colores de interferencia son menores y estos son definidos por su retardo de fase.

Con la colección de imágenes de fotoelasticidad adquiridas no es posible hallar el retardo de fase debido a que es necesario aplicar una técnica de desplazamiento de fase y esta requiere tomar cuatro imágenes simultáneas con configuraciones diferentes de posición angular del polarizador y analizador. Para ello se generó una imagen sintética creada a partir de las ecuaciones de intensidad de luz, que contiene la información precisa del color de interferencia y su retardo de fase, las imágenes reales fueron demoduladas y se pudo identificar el comportamiento del retardo durante la deformación, el cual se puede concluir que las franjas representan cambios de orden y la imagen sintética cumple con el tratamiento de envolvimiento y desenvolvimiento de fase lo que la hace una referencia confiable para el análisis de la película plástica multicapa. Otra ventaja que tiene la imagen sintética es que se puede corregir el gamma para aproximarse al color de la imagen real que posiblemente haya tenido problemas de calibración de color.

---

El aprendizaje del espesor a través de una ANFIS arrojó mejores resultado usando los espacios de color RGB y HSI como entradas ya que el HSI aumenta las características discriminantes del color, estas imágenes de espesor generadas evidencian que la deformación es por regiones y las franjas se desplazan a medida que el material es estirado, también algunos bordes de estas franjas mantienen su espesor y a su vez se traslada por la región de interés. El rendimiento de la red neuronal se puede mejorar sí se genera un conjunto de datos con mayor gama de colores y la medición del espesor con mayor precisión y menor área de contacto, pues asocia una cantidad menor de pixeles que representan el espesor.

Las zonas de esfuerzos están vinculadas con los cambios de intensidad en los colores de interferencia y cuantificando estos cambios se identificó la distribución del esfuerzo en la termodeformación a 60°C se efectuó de manera uniforme debido a que el calor reduce la resistencia a la fuerza de estiramiento. Cabe mencionar que la “ROI” es una ventana de visualización que no contempla el cambio de forma de la película plástica durante la deformación, por tal razón se observa el desplazamiento de material en la ROI y con el fin de corroborar este análisis se realizó un mapa de evolución de espesor como medida de análisis, el cual se puede decir que hay zonas que se desplazan y la evolución del espesor en el pixel intermedio tiende a la reducción. Con este resultado se deduce que los cambios de intensidad significan que hay cambios de esfuerzo, de orden y espesor. También en el experimento de cuantificación aparecen unas franjas donde converge las tensiones de las fronteras de la película, pues el lado izquierdo de la imagen no cambia de forma por estar sujeta por las mordazas y durante la deformación la película no solo se adelgaza respecto al espesor sino que su ancho se reduce, esta curvatura en el borde de la película plástica entre la mordaza y la región de interés se concentran sobre la franja revelada en las imágenes resultantes de la cuantificación.

En el análisis de las imágenes de esfuerzo se llega a una de las conclusiones más importantes y es que para un mismo color de interferencia pueden existir esfuerzos diferentes, esto se debe a la modificación de propiedades mecánicas del material producido por la aplicación de calor a la película plástica multicapa, donde se comporta de manera diferente a la deformación y por ende valores de esfuerzo diferentes a pesar de tener patrones de colores de interferencia similares a la deformación sin carga térmica, lo

cual implica que la película plástica multicapa al ser deformada con carga térmica presenta menos esfuerzo mecánico y afecta directamente el coeficiente fotoelástico de la película.

Considerando las declaraciones en el estado del arte se puede decir que existe una diferencia entre los análisis de carga estática versus las dinámicas, este consiste en que los análisis estáticos el valor del espesor y el coeficiente óptico del material en la mayoría de ocasiones es constante, permitiendo emplear ecuaciones ya estudiadas y trabajadas por la comunidad; pero en condiciones diferentes de temperatura y cambios de forma durante la deformación afectan la estructura interna del material y por ende el coeficiente óptico y el espesor.

## **5.2 Recomendaciones**

Se recomienda para trabajos futuros la implementación de la captura de imágenes con la técnica de desplazamiento de fase con el fin de poder generar una imagen de retardo a partir de imágenes reales.

Dentro la estimación del espesor es necesario extraer mejores mediciones de espesor con un equipo de mayor resolución y de menor área de contacto con el fin de obtener un conjunto de datos de entrenamiento que abarque la mayoría de la gama de colores de interferencia.

En cuanto a la generación de imagen de esfuerzos, sería mejor poder tener una imagen completa de la película en donde se observe los cambios geométricos resultantes de la deformación.

## A. Anexo: Código en Matlab generador de imágenes sintéticas

```

clc;close all;clear all
%% matriz de transmisión espectral para los retardos desde 0 hasta 3000
Lamda=360; % Longitud de onda inicial
retardos=3000; %Retardos de fase de la imagen sintética a generar
for f=1:441 % generación de las intensidades
    for T=0:retardos-1
        L(f,T+1)=(sin(((pi)*T)/Lamda)+0)^2; % retardo cero
        L1(f,T+1)=(sin(((pi)*T)/Lamda)+pi/4)^2; % retardo pi/4
        L2(f,T+1)=(sin(((pi)*T)/Lamda)+pi/2)^2; % retardo pi/2
        L3(f,T+1)=(sin(((pi)*T)/Lamda)+3*pi/4)^2; % retardo 3pi/4
    end
    Lamda=(f*1)+360; % longitud de onda desde 360 hasta 800nm
end
%% GENERACIÓN DE MATRICES ESPECTRALES PARA LAS IMÁGENES
% se presenta en una matriz lineal de con tres filas (RGB) y 3000 retardos
X = load('cie1931_2012(lnm).csv'); % Se carga el Colour Matching Functions de
CIE1931
CIE1931=transpose(X); % se transpone para poder multiplicarla con la matriz L
MRGB=[2.04414 -0.5649 -0.3447; -0.9693 1.8760 0.0416;0.0134 -0.1184 1.0154]; %
Matriz de transformacion para Adobe RGB
% generacion imagen 1
XYZ=CIE1931*L; % Se genera la matriz de coordenadas de visión humana
RGB_linear=MRGB*XYZ; % Transformación lineal RGB Adobe
RGB_linear=RGB_linear/100;
RGB_linear_adj=imadjust(RGB_linear, [0;1],[],0.5);
% generacion imagen 2
XYZ1=CIE1931*L1; % Se genera la matriz de coordenadas de visión humana
RGB_linear1=MRGB*XYZ1; % Transformación lineal RGB Adobe
RGB_linear1=RGB_linear1/100;
RGB_linear1_adj=imadjust(RGB_linear1, [0;1],[],0.5);
% generacion imagen 3
XYZ2=CIE1931*L2; % Se genera la matriz de coordenadas de visión humana
RGB_linear2=MRGB*XYZ2; % Transformación lineal RGB Adobe
RGB_linear2=RGB_linear2/100;
RGB_linear2_adj=imadjust(RGB_linear2, [0;1],[],0.5);
% generacion imagen 4
XYZ3=CIE1931*L3; % Se genera la matriz de coordenadas de visión humana
RGB_linear3=MRGB*XYZ3; % Transformación lineal RGB Adobe
RGB_linear3=RGB_linear3/100;
RGB_linear3_adj=imadjust(RGB_linear3, [0;1],[],0.5);
%% NORMALIZACIÓN % Cada canal de la matriz es normalizada de 0-1
% imagen 1 % se halla los máximos y mínimos de cada canal
maxi(1)=max(RGB_linear_adj(1,:));
mini(1)=min(RGB_linear_adj(1,:));

```

```

maxi(2)=max(RGB_linear_adj(2,:));
mini(2)=min(RGB_linear_adj(2,:));
maxi(3)=max(RGB_linear_adj(3,:));
mini(3)=min(RGB_linear_adj(3,:));
% se normaliza cada canal R, G y B
RGB_norm_8bits(1,:)=(RGB_linear_adj(1,:)-mini(1))*(255/(maxi(1)-mini(1)));
RGB_norm_8bits(2,:)=(RGB_linear_adj(2,:)-mini(2))*(255/(maxi(2)-mini(2)));
RGB_norm_8bits(3,:)=(RGB_linear_adj(3,:)-mini(3))*(255/(maxi(3)-mini(3)));
% Es redondeado los valores de la matriz
RGB_norm_8bits_1R=round(RGB_norm_8bits); clear maxi mini
% imagen 2
% se halla los máximos y mínimos de cada canal
maxi(1)=max(RGB_linear1_adj(1,:));
mini(1)=min(RGB_linear1_adj(1,:));
maxi(2)=max(RGB_linear1_adj(2,:));
mini(2)=min(RGB_linear1_adj(2,:));
maxi(3)=max(RGB_linear1_adj(3,:));
mini(3)=min(RGB_linear1_adj(3,:));
% se normaliza cada canal R, G y B
RGB_norm_8bits1(1,:)=(RGB_linear1_adj(1,:)-mini(1))*(255/(maxi(1)-mini(1)));
RGB_norm_8bits1(2,:)=(RGB_linear1_adj(2,:)-mini(2))*(255/(maxi(2)-mini(2)));
RGB_norm_8bits1(3,:)=(RGB_linear1_adj(3,:)-mini(3))*(255/(maxi(3)-mini(3)));
% Es redondeado los valores de la matriz
RGB_norm_8bits_2R=round(RGB_norm_8bits1); clear maxi mini
% imagen 3
% se halla los máximos y mínimos de cada canal
maxi(1)=max(RGB_linear2_adj(1,:));
mini(1)=min(RGB_linear2_adj(1,:));
maxi(2)=max(RGB_linear2_adj(2,:));
mini(2)=min(RGB_linear2_adj(2,:));
maxi(3)=max(RGB_linear2_adj(3,:));
mini(3)=min(RGB_linear2_adj(3,:));
% se normaliza cada canal R, G y B
RGB_norm_8bits2(1,:)=(RGB_linear2_adj(1,:)-mini(1))*(255/(maxi(1)-mini(1)));
RGB_norm_8bits2(2,:)=(RGB_linear2_adj(2,:)-mini(2))*(255/(maxi(2)-mini(2)));
RGB_norm_8bits2(3,:)=(RGB_linear2_adj(3,:)-mini(3))*(255/(maxi(3)-mini(3)));
% Es redondeado los valores de la matriz
RGB_norm_8bits_3R=round(RGB_norm_8bits2); clear maxi mini
% imagen 4
% se halla los máximos y mínimos de cada canal
maxi(1)=max(RGB_linear3_adj(1,:));
mini(1)=min(RGB_linear3_adj(1,:));
maxi(2)=max(RGB_linear3_adj(2,:));
mini(2)=min(RGB_linear3_adj(2,:));
maxi(3)=max(RGB_linear3_adj(3,:));
mini(3)=min(RGB_linear3_adj(3,:));
% se normaliza cada canal R, G y B
RGB_norm_8bits3(1,:)=(RGB_linear3_adj(1,:)-mini(1))*(255/(maxi(1)-mini(1)));
RGB_norm_8bits3(2,:)=(RGB_linear3_adj(2,:)-mini(2))*(255/(maxi(2)-mini(2)));
RGB_norm_8bits3(3,:)=(RGB_linear3_adj(3,:)-mini(3))*(255/(maxi(3)-mini(3)));
% Es redondeado los valores de la matriz
RGB_norm_8bits_4R=round(RGB_norm_8bits3); clear maxi mini
%% GENERACION DE IMAGEN RGB
altura=200
for in=1:retardos
% Imagen 1
    mapa(1:altura,in,1)=RGB_norm_8bits_1R(1,in); % Canal R
    mapa(1:altura,in,2)=RGB_norm_8bits_1R(2,in); % Canal G
    mapa(1:altura,in,3)=RGB_norm_8bits_1R(3,in); % Canal B
% Imagen 2
    mapal(1:altura,in,1)=RGB_norm_8bits_2R(1,in);

```

```

    mapa1(1:altura,in,2)=RGB_norm_8bits_2R(2,in);
    mapa1(1:altura,in,3)=RGB_norm_8bits_2R(3,in);
% Imagen 3
    mapa2(1:altura,in,1)=RGB_norm_8bits_3R(1,in);
    mapa2(1:altura,in,2)=RGB_norm_8bits_3R(2,in);
    mapa2(1:altura,in,3)=RGB_norm_8bits_3R(3,in);
% Imagen 4
    mapa3(1:altura,in,1)=RGB_norm_8bits_4R(1,in);
    mapa3(1:altura,in,2)=RGB_norm_8bits_4R(2,in);
    mapa3(1:altura,in,3)=RGB_norm_8bits_4R(3,in);
end
mapa=uint8(mapa); mapa1=uint8(mapa1);
mapa2=uint8(mapa2); mapa3=uint8(mapa3);
figure(1);imshow(mapa); figure(2);imshow(mapa1);
figure(3);imshow(mapa2); figure(4);imshow(mapa3);
%% grafica del espectro sin ajuste
figure('Name','Espectro Color Sintetica','NumberTitle','off','Color',[1 1 1]);
plot(RGB_linear(1,:), 'r'); hold on; plot(RGB_linear(2,:), 'g');hold on;
plot(RGB_linear(3,:), 'b');
legend('Canal Rojo','Canal Verde','Canal Azul');
% axis([0,retardos,0,260]);
set(gca,'fontsize',14);
xlabel ('Retardo de Fase (nm)');
ylabel ('Intensidad (0-1)');
title ('Espectro Imagen Sintetica de Colores de Interferencia Sin Ajuste ')
grid on
%% grafica del espectro con ajuste gamma=0.5
figure('Name','Espectro Color Sintetica Sin Ajuste','NumberTitle','off','Color',[1 1 1]);
plot(RGB_linear_adj(1,:), 'r'); hold on; plot(RGB_linear_adj(2,:), 'g');hold on;
plot(RGB_linear_adj(3,:), 'b');
legend('Canal Rojo','Canal Verde','Canal Azul');
% axis([0,retardos,0,260]);
set(gca,'fontsize',14);
xlabel ('Retardo de Fase (nm)');
ylabel ('Intensidad (0-1)');
title ('Espectro Imagen Sintetica de Colores de Interferencia con Ajuste ')
grid on
%% grafica del espectro ajustado y normalizado de 0 a 255
figure('Name','Espectro Color Sintetica','NumberTitle','off','Color',[1 1 1]);
plot(mapa(1,:,1), 'r'); hold on; plot(mapa(1,:,2), 'g');hold on;
plot(mapa(1,:,3), 'b');
legend('Canal Rojo','Canal Verde','Canal Azul');
axis([0,retardos,-5,260]);
set(gca,'fontsize',14);
xlabel ('Retardo de Fase (nm)');
ylabel ('Intensidad (0-255)');
title ('Espectro Imagen Sintetica de Colores de Interferencia ')
grid on
%% grafica del espectro cielab1931 2012
XX=[360:800];
figure('Name','CIE1931-2012','NumberTitle','off','Color',[1 1 1]);
plot(XX,CIE1931(1,:), 'r'); hold on; plot(XX,CIE1931(2,:), 'g');hold on;
plot(XX,CIE1931(3,:), 'b');
legend('Canal Rojo','Canal Verde','Canal Azul');
%axis([0,retardos,-5,260]);
set(gca,'fontsize',14);
xlabel ('Longitud de Onda (nm)');
ylabel ('Intensidad');
title ('Espectro de Color CIE1931-2012 ')
grid on

```

```
% Almacenamiento de Imágenes con colores de interferencia con desplazamiento de fase
imwrite(mapa, 'sintetical_pi4_1nm.bmp');
imwrite(mapa1, 'sintetica2_pi4_1nm.bmp');
imwrite(mapa2, 'sintetica3_pi4_1nm.bmp');
imwrite(mapa3, 'sintetica4_pi4_1nm.bmp');
```

## B. Anexo: Código en Matlab de involucrimiento de fase

```

sclc; close all; clear all
%% matriz de transmisión espectral para los retardos desde 0 hasta 3000
Lamda=360;
retardos=3000;
for f=1:441
    for T=0:retardos-1
        L(f,T+1)=(sin((pi)*T)/Lamda)^2; % retardo cero
        L1(f,T+1)=(sin((pi+(pi/4))*T)/Lamda)^2; % retardo pi/4
        L2(f,T+1)=(sin((pi+(pi/2))*T)/Lamda)^2; % retardo pi/2
        L3(f,T+1)=(sin((pi+(3*pi/4))*T)/Lamda)^2; % retardo 3pi/4
    end
    Lamda=(f*1)+360; % longitud de onda desde 360 hasta 830nm
end
%% GENERACION DE MATRICES ESPECTRALES PARA LAS IMAGENES
% se presenta en una matriz lineal de con tres filas (RGB) y 3000 retardos
X = load('cie1931_2012(1nm).csv'); % Se carga el Colour Matching Functions de
CIE1931
CIE1931=transpose(X); % se transpone para poder multiplicarla con la matriz L
MRGB=[2.04414 -0.5649 -0.3447; -0.9693 1.8760 0.0416;0.0134 -0.1184 1.0154]; %
Matriz de transformacion para Adobe RGB
% generacion imagen 1
XYZ=CIE1931*L; % Se genera la matriz de coordenadas de vision humana
RGB_linear=MRGB*XYZ; % Transformación lineal RGB Adobe
RGB_linear=RGB_linear/100;
RGB_linear_adj=imadjust(RGB_linear, [0;1],[],0.5);
% generacion imagen 2
XYZ1=CIE1931*L1; % Se genera la matriz de coordenadas de vision humana
RGB_linear1=MRGB*XYZ1; % Transformación lineal RGB Adobe
RGB_linear1=RGB_linear1/100;
RGB_linear1_adj=imadjust(RGB_linear1, [0;1],[],0.5);
% generacion imagen 3
XYZ2=CIE1931*L2; % Se genera la matriz de coordenadas de vision humana
RGB_linear2=MRGB*XYZ2; % Transformación lineal RGB Adobe
RGB_linear2=RGB_linear2/100;
RGB_linear2_adj=imadjust(RGB_linear2, [0;1],[],0.5);
% generacion imagen 4
XYZ3=CIE1931*L3; % Se genera la matriz de coordenadas de vision humana
RGB_linear3=MRGB*XYZ3; % Transformación lineal RGB Adobe
RGB_linear3=RGB_linear3/100;
RGB_linear3_adj=imadjust(RGB_linear3, [0;1],[],0.5);
%% NORMALIZACION
% Cada canal de la matriz es normalizada de 0-1
% imagen 1 % se halla los maximos y minimos de cada canal

```

```

maxi(1)=max( RGB_linear_adj(1,:) );
mini(1)=min( RGB_linear_adj(1,:) );
maxi(2)=max( RGB_linear_adj(2,:) );
mini(2)=min( RGB_linear_adj(2,:) );
maxi(3)=max( RGB_linear_adj(3,:) );
mini(3)=min( RGB_linear_adj(3,:) );
% se normaliza cada canal R, G y B
RGB_norm_8bits(1,:)=(RGB_linear_adj(1,:)-mini(1))*(255/(maxi(1)-mini(1)));
RGB_norm_8bits(2,:)=(RGB_linear_adj(2,:)-mini(2))*(255/(maxi(2)-mini(2)));
RGB_norm_8bits(3,:)=(RGB_linear_adj(3,:)-mini(3))*(255/(maxi(3)-mini(3)));
% Es redondeado los valores de la matriz
RGB_norm_8bits_1R=round(RGB_norm_8bits); clear maxi mini
% imagen 2 % se halla los maximos y minimos de cada canal
maxi(1)=max( RGB_linear1_adj(1,:) );
mini(1)=min( RGB_linear1_adj(1,:) );
maxi(2)=max( RGB_linear1_adj(2,:) );
mini(2)=min( RGB_linear1_adj(2,:) );
maxi(3)=max( RGB_linear1_adj(3,:) );
mini(3)=min( RGB_linear1_adj(3,:) );
% se normaliza cada canal R, G y B
RGB_norm_8bits1(1,:)=(RGB_linear1_adj(1,:)-mini(1))*(255/(maxi(1)-mini(1)));
RGB_norm_8bits1(2,:)=(RGB_linear1_adj(2,:)-mini(2))*(255/(maxi(2)-mini(2)));
RGB_norm_8bits1(3,:)=(RGB_linear1_adj(3,:)-mini(3))*(255/(maxi(3)-mini(3)));
% Es redondeado los valores de la matriz
RGB_norm_8bits_2R=round(RGB_norm_8bits1); clear maxi mini
% imagen 3
% se halla los maximos y minimos de cada canal
maxi(1)=max( RGB_linear2_adj(1,:) );
mini(1)=min( RGB_linear2_adj(1,:) );
maxi(2)=max( RGB_linear2_adj(2,:) );
mini(2)=min( RGB_linear2_adj(2,:) );
maxi(3)=max( RGB_linear2_adj(3,:) );
mini(3)=min( RGB_linear2_adj(3,:) );
% se normaliza cada canal R, G y B
RGB_norm_8bits2(1,:)=(RGB_linear2_adj(1,:)-mini(1))*(255/(maxi(1)-mini(1)));
RGB_norm_8bits2(2,:)=(RGB_linear2_adj(2,:)-mini(2))*(255/(maxi(2)-mini(2)));
RGB_norm_8bits2(3,:)=(RGB_linear2_adj(3,:)-mini(3))*(255/(maxi(3)-mini(3)));
% Es redondeado los valores de la matriz
RGB_norm_8bits_3R=round(RGB_norm_8bits2); clear maxi mini
% imagen 4 % se halla los maximos y minimos de cada canal
maxi(1)=max( RGB_linear3_adj(1,:) );
mini(1)=min( RGB_linear3_adj(1,:) );
maxi(2)=max( RGB_linear3_adj(2,:) );
mini(2)=min( RGB_linear3_adj(2,:) );
maxi(3)=max( RGB_linear3_adj(3,:) );
mini(3)=min( RGB_linear3_adj(3,:) );
% se normaliza cada canal R, G y B
RGB_norm_8bits3(1,:)=(RGB_linear3_adj(1,:)-mini(1))*(255/(maxi(1)-mini(1)));
RGB_norm_8bits3(2,:)=(RGB_linear3_adj(2,:)-mini(2))*(255/(maxi(2)-mini(2)));
RGB_norm_8bits3(3,:)=(RGB_linear3_adj(3,:)-mini(3))*(255/(maxi(3)-mini(3)));
% Es redondeado los valores de la matriz
RGB_norm_8bits_4R=round(RGB_norm_8bits3); clear maxi mini

%% GENERACION DE IMAGEN RGB
altura=200
for in=1:retardos
% Imagen 1
  mapa(1:altura,in,1)=RGB_norm_8bits_1R(1,in); % Canal R
  mapa(1:altura,in,2)=RGB_norm_8bits_1R(2,in); % Canal G

```

---

```

    mapa(1:altura,in,3)=RGB_norm_8bits_1R(3,in); % Canal B
% Imagen 2
    mapa1(1:altura,in,1)=RGB_norm_8bits_2R(1,in);
    mapa1(1:altura,in,2)=RGB_norm_8bits_2R(2,in);
    mapa1(1:altura,in,3)=RGB_norm_8bits_2R(3,in);
% Imagen 3
    mapa2(1:altura,in,1)=RGB_norm_8bits_3R(1,in);
    mapa2(1:altura,in,2)=RGB_norm_8bits_3R(2,in);
    mapa2(1:altura,in,3)=RGB_norm_8bits_3R(3,in);
% Imagen 4
    mapa3(1:altura,in,1)=RGB_norm_8bits_4R(1,in);
    mapa3(1:altura,in,2)=RGB_norm_8bits_4R(2,in);
    mapa3(1:altura,in,3)=RGB_norm_8bits_4R(3,in);
end
mapa=uint8(mapa); mapa1=uint8(mapa1);
mapa2=uint8(mapa2); mapa3=uint8(mapa3);
figure(1);imshow(mapa); figure(2);imshow(mapa1);
figure(3);imshow(mapa2); figure(4);imshow(mapa3);
% Almacenamiento de Imagenes con colores de interferencia con desplazamiento de
fase
imwrite(mapa, 'sintetical_pi4_lnm.bmp'); imwrite(mapa1,
'sintetica2_pi4_lnm.bmp');
imwrite(mapa2, 'sintetica3_pi4_lnm.bmp'); imwrite(mapa3,
'sintetica4_pi4_lnm.bmp');
%% ENVOLVIMIENTO
% Conversion de imagenes a escala de grises
image1=double(mapa(:,:,3))/255;
image2=double(mapa1(:,:,3))/255;
image3=double(mapa2(:,:,3))/255;
image4=double(mapa3(:,:,3))/255;
% Retardo Fraccional
phi= atan((image4 - image2)./(image1 - image3));
imagen_envuelta=2*phi;
% Muestra la imagen de la fase envuelta
figure, colormap(gray(256)), imagesc(phi)
title('Fase envuelta mostrada como una intensidad visual')
xlabel('Píxeles'), ylabel('Píxeles')
% Normalizacion a 0-255
max_im=max(max(imagen_envuelta));
min_im=min(min(imagen_envuelta));
Im_wrapp=(imagen_envuelta-min_im)*(255/max_im-min_im);
Im_wrapp8=uint8(Im_wrapp);

```



## C. Anexo: Código en Matlab de cuantificación de cambios de intensidad

```

clear all; clc; close all
tic%Contador de tiempo
t=900;%Número de imágenes
I = imread('D:\maestria\tesis 2016-2\EXPERIMENTOS\SUMATORIA DE CAMBIOS\20_v1_crop\1.jpg');%
carpeta de imágenes
[x,y,z]=size(I);
DiferenciaR=zeros(x,y); DiferenciaG=zeros(x,y);
DiferenciaB=zeros(x,y); DiferenciaT=zeros(x,y);
Incrementos1=zeros(x,y);% almacenador
for i=2:t%Rango de la cantidad de imágenes
contador=int2str(1);%imagen de lectura actual en string
contador2=int2str(i-1);%Imagen anterior en string
direccion='D:\maestria\tesis 2016-2\EXPERIMENTOS\SUMATORIA DE
CAMBIOS\20_v1_crop\';%ubicación de las imágenes
Nombre=([direccion,contador]);
Nombre2=([direccion,contador2]);%la dirección con el nombre del contador
I1 = imread([Nombre,'.jpg']);% Imagen del presente
I2 = imread([Nombre2,'.jpg']);% Imagen anterior
DiferenciaR=((double(I1(:,:,1))-double(I2(:,:,1))).^2);
DiferenciaG=((double(I1(:,:,2))-double(I2(:,:,2))).^2);
DiferenciaB=((double(I1(:,:,3))-double(I2(:,:,3))).^2);
DiferenciaT=sqrt(DiferenciaR+DiferenciaG+DiferenciaB);
Incrementos1=Incrementos1+DiferenciaT;
In1=uint8(((Incrementos1-82708)/(264325-82708))*255);
imwrite(In1,'cuantificacion_20C_1.bmp');
csvwrite('cuantificacion_20C_1.csv',In1);
end
%%
figure, imshow(In1);
figure('Name','Cuantificación de Cambios','NumberTitle','off','Color',[1 1 1]),
imagesc(Incrementos1)
% plot(Tu archivo,'r')
set(gca,'fontsize',14);
xlabel('Largo (pix)');
ylabel('Ancho (pix)');
axis off
axis image;
colormap('jet');
set(gca,'CLim',[0 255]);
tmp2=getframe;
image(tmp2.cdata);
imwrite(tmp2.cdata,'20_1.bmp'); % graba imagen en escala de colores Jet
toc%Termina el tiempo

```

## D. Anexo: Código en Matlab de generación imagen de espesores

```

clear all; clc; close all
tic%Contador de tiempo
t=900;%Número de imágenes
direccion='D:\maestria\tesis 2016-2\DOCUMENTO DE TESIS\EXP_TESIS\COMPARACION Y
ASIGNACION DE COLOR VIDEOS\60_v9_crop\';%ubicación de las imágenes
direccion1='D:\maestria\tesis 2016-2\DOCUMENTO DE TESIS\EXP_TESIS\COMPARACION Y
ASIGNACION DE COLOR VIDEOS\60_v9_crop_eee\';%ubicación de las imágenes
%%
for f=5:5:t%Rango de la cantidad de imágenes
contador=int2str(f);%imagen de lectura actual en string
% contador2=int2str(i-1);%Imagen anterior en string
Nombre=([direccion,contador]);
Nombre1=([direccion1,contador]);
Ireal = imread([Nombre,'.jpg']);% Imagen del presente
Ireal=imresize(Ireal,0.2);
[s,d]=size(Ireal(:, :, 1));
Ie=size(s,d);
anfis_e=readfis('anfis_gauss2(3_3_3_3_3)_30e_lineal');
F=Ireal;
F=im2double(F);
R = F(:, :, 1);
G = F(:, :, 2);
B = F(:, :, 3);
H=acos((0.5*((R-G)+(R-B)))/((sqrt((R-G).^2+(R-B).*(G-B)))+eps));
H(B>G)=2*pi-H(B>G);
H=H/(2*pi);
S=1-3.*(min(min(R,G),B))./(R+G+B+eps);
I=(R+G+B)/3;
for i=1:s
    for j=1:d
        Ie(i,j)=evalfis([R(i,j) G(i,j) B(i,j) H(i,j) S(i,j) I(i,j)], anfis_e);
    end
end
Ieer=Ie;
for yy=1:s
    for rr=1:d
        if Ieer(yy,rr)<=75
            Ieer(yy,rr)=75;
        end
        if Ieer(yy,rr)>=138

```

---

```
        Ieer(yy,rr)=138;
    end
end
end
Iee=uint8(((Ieer-75)/(138-75))*255);
Iee=imcomplement(Iee);
imwrite(Iee,[Nombre1,'.bmp']);
csvwrite([Nombre1,'.csv'],Ieer);
end
%%
toc
```



## E. Anexo: Código en Matlab de la evolución del espesor

```

clear all; close all; clc
tic%Contador de tiempo
t=900;%Número de imágenes
I = imread('D:\maestria\tesis 2016-2\DOCUMENTO DE
TESIS\EXP_TESIS\TIME_STACK\60_v2_crop\1.jpg');% carpeta de imágenes
[s,d,z]=size(I);
Ie=size(s,d);
posicion_x=1100; %posicion máscara
direccion='D:\maestria\tesis 2016-2\DOCUMENTO DE
TESIS\EXP_TESIS\TIME_STACK\60_v2_crop\';%ubicación de las imágenes
anfis_e=readfis('anfis_gauss2(3_3_3_3_3)_30e_lineal');
for i=1:t%Rango de la cantidad de imágenes
contador=int2str(i);%imagen de lectura actual en string
Nombre=[direccion,contador];
I1 = imread([Nombre,'.jpg']);% Imagen
F = I1;
F=im2double(F);
R = F(:,:,1);% canal R
G = F(:,:,2);% canal G
B = F(:,:,3);% canal B
H=acos((0.5*((R-G)+(R-B)))/((sqrt((R-G).^2+(R-B).*(G-B))+eps)));
H(B>G)=2*pi-H(B>G);
H=H/(2*pi);
S=1-3.*(min(min(R,G),B))./(R+G+B+eps);
I=(R+G+B)/3;
for p=1:s
    Ie(p,1)=evalfis([R(p,posicion_x) G(p,posicion_x) B(p,posicion_x) H(p,posicion_x)
S(p,posicion_x) I(p,posicion_x)], anfis_e);
end
Iee=Ie;
for yy=1:s
    if Iee(yy)<=75
        Iee(yy)=75;
    end
    if Iee(yy)>=138
        Iee(yy)=138;
    end
end
im_timestack(:,i)=Iee;
end
Im_tmstck=uint8(((im_timestack-75)/(138-75))*255);% normaliza 0-255
imwrite(Im_tmstck,'tmstck_60C_1100_6i.bmp');
csvwrite('tmstck_60C_1100_6i.csv',Im_tmstck);
imwrite(imcomplement(Im_tmstck),'tmstck_60C_1100_6i_inv.bmp');
csvwrite('tmstck_60C_1100_6i_inv.csv',imcomplement(Im_tmstck));
tmp=im_timestack;
imagesc(tmp);
axis off
axis image;

```

```
colormap('jet');  
set(gca,'CLim',[75 138]);  
tmp2=getframe;  
image(tmp2.cdata);  
imwrite(tmp2.cdata,'timestack60c11006i.bmp');  
imagesc(im_timestack);  
toc%Termina el tiempo
```

## F. Anexo: Código en Matlab de generación imagen retardo de fase

```

clear all; close all; clc
t=900;%maximo frames
direccion='D:\maestria\tesis 2016-2\DOCUMENTO DE TESIS\EXP_TESIS\COMPARACION Y
ASIGNACION DE COLOR VIDEOS\20_v9_crop\';%ubicación de las imágenes
direccion1='D:\maestria\tesis 2016-2\DOCUMENTO DE TESIS\EXP_TESIS\COMPARACION Y
ASIGNACION DE COLOR VIDEOS\20_v9_crop_x0\';%ubicación de las imágenes
for f=5:5:t%Rango de la cantidad de imágenes
contador=int2str(f);%imagen de lectura actual en string
Nombre=( [direccion,contador] );
Nombre1=( [direccion1,contador] );
Ir = imread([Nombre,'.jpg']);% Imagen del presente
Ird=double(Ir); Irt=Ird;
[filas,columnas]=size(Ird(:,:,1));
Is = imread('sintetica_gam_1.bmp');%lectura imagen sintetica
Isd=double(Is); [filas_s,columnas_s]=size(Is(:,:,1));
e1=220;%valor inicial del error
for i=1:filas
for j=1:columnas
for x=1:columnas_s
error=sqrt(((Ird(i,j,1)-Isd(1,x,1))^2+(Ird(i,j,2)-Isd(1,x,2))^2+(Ird(i,j,3)-
Isd(1,x,3))^2));
if error<e1
e=error;
Irt(i,j,1)=Isd(1,x,1);
Irt(i,j,2)=Isd(1,x,2);
Irt(i,j,3)=Isd(1,x,3);
Iret(i,j)=x;
e1=error;
end
end
end
e1=220;
end
end
imwrite(uint8(Irt),[Nombre1,'.bmp']);
csvwrite([Nombre1,'.csv'],Iret);
Iret8=uint8((Iret*255)/3000);
Iret8=imcomplement(Iret8);
imwrite(Iret8,[Nombre1,'.bmp']);
end

```





## G. Anexo: Código en Matlab de generación imagen de esfuerzos

```

clc; clear all, close all;
X = load('curva_60v9_30s.csv'); %curva de fuerza vs tiempo
[f,c]=size(X);
x=X(:,1);% asignacion eje x
y=X(:,2);% asignacion eje y
xi=0:0.3489:314; % asignacion nuevo eje para interpolacion a frames
figure
yi = interp1(x,y,xi,'spline'); % interpolacion de grafica fuerza vs frame
plot(x,y,'o',xi,yi,':');
xlim([0 314]);
title('Fuerza vs Frame');
t=900;%Número de imágenes
I = load('D:\maestria\tesis 2016-2\DOCUMENTO DE TESIS\EXP_TESIS\MAPA
ESFUERZOS\60_v9_crop_e6\5.csv');% Imagen del espesor
[s,d]=size(I);
Ies=size(s,d); % reserva imagen de esfuerzos
direccion='D:\maestria\tesis 2016-2\DOCUMENTO DE TESIS\EXP_TESIS\MAPA
ESFUERZOS\60_v9_crop_e6\';%ubicación de las imágenes
direccion1='D:\maestria\tesis 2016-2\DOCUMENTO DE TESIS\EXP_TESIS\MAPA
ESFUERZOS\60_v9_crop_esf6\';%ubicación de las imágenes
for i=5:5:t %Rango de la cantidad de imágenes
contador=int2str(i);%imagen de lectura actual en string
Nombre=( [direccion,contador] );
Nombre1=( [direccion1,contador] );
I = load([Nombre, '.csv']);% Imagen
for w=1:s
    for z=1:d
        F(w,z)=yi(i)/188; % fuerza distribuida en el ancho de la imagen
    end
end
Im_esf=F./((I*0.000053)); % Asignacion del esfuerzo a la imagen de esfuerzos
%%normalización en escalas de colores
imagesc(Im_esf);
axis off
axis image;
colormap('jet');
set(gca,'CLim',[0 118]);
tmp2=getframe;
image(tmp2.cdata);
imwrite(tmp2.cdata,[Nombre1, '.bmp']);
end

```

## Bibliografía

- Abshirini, M., Dehnavi, M. Y., Beni, M. A., & Soltani, N. (2014). Interaction of two parallel U-notches with tip cracks in PMMA plates under tension using digital image correlation. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 1–8.  
<http://doi.org/10.1016/j.tafmec.2014.02.001>
- Agudelo, A. C. (2009). *Evaluación y desempeño de láminas flexibles usadas en el empaque al vacío de productos carnicos. Tesis de Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos*. Universidad Nacional de Colombia-Medellín.
- Ajovalasit, A., Petrucci, G., & Scafidi, M. (2010). RGB Photoelasticity : Review and Improvements, 137–147.
- Ajovalasit, A., Petrucci, G., & Scafidi, M. (2015). Review of RGB photoelasticity. *Optics and Lasers in Engineering*, 68, 58–73. <http://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2014.12.008>
- Ashokan, K., & Ramesh, K. (2009). Finite Element Simulation of Isoclinic and Isochromatic Phasemaps for Use in Digital Photoelasticity. *Experimental Techniques*, 33(1), 38–44. <http://doi.org/10.1111/j.1747-1567.2008.00368.x>
- Ashter, S. A. (2013). *Thermoforming of Single and Multilayer Laminates, Plastic Films Technologies, Testing, and Applications*. (W. Andrew, Ed.) (1er Editio). Elsevier.
- Asner, G. P., & Heidebrecht, K. B. (2002). Spectral unmixing of vegetation, soil and dry carbon cover in arid regions: Comparing multispectral and hyperspectral observations. *International Journal of Remote Sensing*, 23(19), 3939–3958.  
<http://doi.org/10.1080/01431160110115960>
- ASTM D882-02. (2002). D 882: Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting. *Astm*, 14, 1–10.
- Brewster, D. (1816). On the Communication of the Structure of Doubly Refracting Crystals

to Glass , Muriate of Soda , Fluor Spar , and Other Substances , by Mechanical Compression and Dilatation. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 106, 156–178.

- Briñez, J. C. (2013). *Caracterización de la deformación de películas plásticas mediante el estudio de patrones de interferencia de color producidos por la polarización de la luz, aplicando técnicas para el análisis digital de imágenes. Tesis de Maestría en Automatización y Control Industrial*. Instituto Tecnológico Metropolitano - ITM.
- Briñez, J. C., Restrepo, A., & Branch, J. W. (2016). High stress concentration analysis using RGB intensity changes in dynamic photoelasticity videos. In *STSIVA*.
- Briñez, J. C., Restrepo, A., & Lopez, F. (2003). Estudios de fotoelasticidad: Desarrollos y aplicaciones, 1–10.
- Chang, M., & Sliz, R. (2009). An Edge Detection Algorithm for Photoelasticity Analysis. *Strain Journal*, 498–505.
- Costantino, S., Martinez, O., & Torga, J. (2003). Wide band interferometry for thickness measurement. *Optics Express*, 11(8), 952–7. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19461812>
- Crippa, A., Sydenstricker, T. H. D., & Amico, S. C. (2008). Evaluation of Multilayer Thermoformed Films for Food Packaging. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 47(10), 991–995. <http://doi.org/10.1080/03602550802353110>
- Ellrich, F., Theuer, M., Torosyan, G., Jonuscheit, J., & Beigang, R. (2008). Thin-film measurements with THz-radiation. *2008 33rd International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, (2), 1–2. <http://doi.org/10.1109/ICIMW.2008.4665779>
- Fathi, A., & Naghsh-Nilchi, A. R. (2012). Noise tolerant local binary pattern operator for efficient texture analysis. *Pattern Recognition Letters*, 33(9), 1093–1100. <http://doi.org/10.1016/j.patrec.2012.01.017>
- Goldstein, F. (1998). Film Thickness of “ Thick Thin Films ” by Spectroscopy.
- Grewal, G. S., Dubey, V. N., & Claremont, D. J. (2006). Isochromatic Demodulation by Fringe Scanning, 273–281.
- 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.

- <http://doi.org/10.1109/TIM.2004.838911>
- Heam, P., & East, C. (1997). 819 machine vision for ice layer thickness measurements 1, 0–3.
- Hlubina, P., & Lunacek, J. (2011). Spectral interferometry and reflectometry used to measure thin films, *92*(2), 203–207.
- Iniewski, K. (2013). 8.1.1 Color Optoelectronic Devices Page. In *Smart Sensors for Industrial Applications*. Taylor & Francis.
- Jain, A. K., Duin, R. P. W., & Mao, J. (2000). Statistical pattern recognition: a review. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, *22*(1), 4–37. <http://doi.org/10.1109/34.824819>
- Jambu, M. (1991). *Exploratory and multivariate data analysis*. London: Academic Press.
- Jones, I. A., & Wang, P. (2003). Complete Fringe Order Determination in Digital Photoelasticity using Fringe Combination Matching, 121–130.
- Kasimayan, T., & Ramesh, K. (2011). Adaptive Smoothing for Isoclinic Parameter Evaluation in Digital Photoelasticity, 371–375. <http://doi.org/10.1111/j.1475-1305.2009.00619.x>
- Kaur, S., & Gmt, E. R. (2015). Comparative Analyses of YCbCr Color Space and CIELab Color Space Based On DWT and SVD, (September), 4–5.
- Kitagawa, K. (2004). 3 = D Profiling of a Transparent Film using White-Light Interferometry, 585–590.
- Kitagawa, K. (2012). Transparent film thickness measurement by three-wavelength interference method: An extended application of Global Model Fitting algorithm. In *2012 9th France-Japan & 7th Europe-Asia Congress on Mechatronics (MECATRONICS) / 13th Int'l Workshop on Research and Education in Mechatronics (REM)* (pp. 94–100). IEEE. <http://doi.org/10.1109/MECATRONICS.2012.6450993>
- Korifi, R., Le Dréau, Y., Antinelli, J.-F., Valls, R., & Dupuy, N. (2012). CIEL\*a\*b color space predictive models for colorimetry devices - Analysis of perfume quality. *Talanta*.
- Kumar, G., & Bhatia, P. K. (2014). A Detailed Review of Feature Extraction in Image Processing Systems. *2014 Fourth International Conference on Advanced Computing & Communication Technologies*, (FEBRUARY 2014), 5–12. <http://doi.org/10.1109/ACCT.2014.74>

- Li, B., Yang, G. B., Ni, F., & Zhu, Q. R. (2011). Investigation of Dynamic Photoelasticity Based on a Three-Dimensional Model. *Applied Mechanics and Materials*.  
<http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.83.261>
- Lim, J., & Ravi-Chandar, K. (2007). Photomechanics in dynamic fracture and friction studies. *Strain*, 43(3), 151–165. <http://doi.org/10.1111/j.1475-1305.2007.00343.x>
- Meléndez, F., Briñez, J. C., Restrepo, A., & Branch, J. W. (2015). Poster: Identificación de variaciones del efecto de la temperatura en la deformación de películas plásticas analizando el comportamiento temporal de la fotoelasticidad. In *XIV ENCUENTRO NACIONAL DE OPTICA V CONFERENCIA ANDINA Y DEL CARIBE EN OPTICA Y SUS APLICACIONES ENO - CANCOA 2015*. Cali: Universidad del Valle.
- Muller, R., & Vergnes, B. (1996). Validity of the stress optical law and application of birefringence to polymer complex flows. *Rheology for Polymer Melt Processing*, (1), 258.
- Myint, S. W. (2001). A Robust Texture Analysis and Classification Approach for Urban Land-Use and Land-Cover Feature Discrimination. *Geocarto International*, 16(4), 29–40. <http://doi.org/10.1080/10106040108542212>
- Navarro, H., Martínez, M., Saavedra, G., & Pons, A. (2013). Photoelastic Analysis of Partially Occluded Objects With an Integral-Imaging Polaroscope, (April 2014), 255–262.
- Pascale, D. (2003). A Review of RGB Color Spaces A Review of RGB Color Spaces, 21. Retrieved from [http://www.babelcolor.com/download/A review of RGB color spaces.pdf](http://www.babelcolor.com/download/A%20review%20of%20RGB%20color%20spaces.pdf) (August 2011)
- Patterson, E. A. (2002). Digital Photoelasticity : Principles , Practice and Potential Measurements Lecture, 27–39.
- Raimond, B., Seymour, C., & Carraher, C. (1995). *Introducción a la química de los polímeros*. (E. Reverté, Ed.).
- Ramesh, K. (2000). *Digital Photoelasticity: Advanced Techniques and Applications*. Berlin: Springer.
- Ramesh, K., & Mangal, S. K. (1998). Data acquisition techniques in digital photoelasticity: a review. *Optics and Lasers in Engineering*, 30(1), 53–75.  
[http://doi.org/10.1016/S0143-8166\(97\)00105-X](http://doi.org/10.1016/S0143-8166(97)00105-X)
- Ramesh, K., & Ramakrishnan, V. (2011). Digital photoelasticity – A comprehensive

- review. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 46(4), 245–266.  
<http://doi.org/10.1177/0309324711401501>
- Rarnesh, K., Govindarajan, R., & Engineering, M. (1997). Towards a device independent digital image processing software for photoelastic analysis, (November), 115–120.
- Seymour, R., & Carraher, C. (2002). *Química de los polímeros*. (E. Reverté, Ed.). New York.
- Siegmann, P., Patterson, E. A., & Backman, D. (2004). AN ALTERNATIVE APPROACH TO UNWRAPPING PHOTOELASTIC.
- Sorensen, B. E. (2013). A revised Michel-Lévy interference colour chart based on first-principles calculations, (September 2012), 5–10. <http://doi.org/10.1127/0935-1221/2013/0025-2252>
- Swain, D., Thomas, B. P., Philip, J., & Pillai, S. A. (2015). Novel calibration and color adaptation schemes in three-fringe RGB photoelasticity. *Optics and Lasers in Engineering*, 66, 320–329. <http://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2014.10.007>
- Tay, a., & Lee, J. H. (2006). Robust Real-Time Thin Film Thickness Estimation. *The 17th Annual SEMI/IEEE ASMC 2006 Conference*, 57–62.  
<http://doi.org/10.1109/ASMC.2006.1638724>
- Wang, W. (1990). Photoelasticity. *Department of Mechanical Engineering*. University of Washington.
- Wang, Y., Cui, Y., Chen, S., Zhang, P., Huang, H., & Huang, G. Q. (2010). Study on HSI color model-based fruit quality evaluation. *Proceedings - 2010 3rd International Congress on Image and Signal Processing, CISP 2010*, 6, 2677–2680.  
<http://doi.org/10.1109/CISP.2010.5647943>
- Watanabe, S. (1985). *Pattern recognition: human and mechanical*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Yang, N., Wang, Y., Lv, J., & Li, H. (2009). Research on Thickness Measurement of Transparent Object Based on CCD Vision System. *2009 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, 113–116.  
<http://doi.org/10.1109/ICMTMA.2009.594>
- Zuccarello, B. (2005). Complete Isochromatic Fringe-order Analysis in Digital Photoelasticity by Fourier Transform and Load Stepping, 49–58.



**TITULO:**

**CARACTERIZACIÓN DE LOS CAMBIOS EN LAS PELÍCULAS PLÁSTICAS  
MULTICAPA EN PROCESOS DE TERMODEFORMACIÓN USANDO  
FOTOELASTICIDAD DIGITAL**

**AUTOR: FERNANDO MELÉNDEZ LOZADA**

  
FIRMA

**DIRECTOR: ALEJANDRO RESTREPO MARTÍNEZ**

  
FIRMA

**CO-DIRECTOR: FRANCISCO EUGENIO LÓPEZ GIRALDO**

  
FIRMA

**FECHA: 30 DE MAYO DE 2017**