



Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología

Informe técnico

Análisis de interferogramas utilizando el software comercial Apex y Durango

Pedro Cebrian Xochihuila
Martha Rosete Aguilar
Neil C. Bruce Davidson
Rosa Alejandra Ramírez Ramírez
Rafael Izazaga Pérez

12 de octubre de 2021

Título: Análisis de interferogramas utilizando el software comercial *Apex*

Autores: Pedro Cebrian Xochihuila¹, Martha Rosete Aguilar¹, Neil C. Bruce Davidson¹, Rosa Alejandra Ramírez Ramírez¹, Rafael Izazaga Pérez²

Afiliación: 1. Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología
ICAT-UNAM

2. Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica

Resumen

Existen diferentes programas comerciales y software libre para evaluar la calidad de superficies ópticas a través del análisis de sus interferogramas que se obtienen al comparar una superficie de prueba contra una superficie de referencia en algún tipo de interferómetro. Sin embargo, estos programas presentan ventajas y desventajas unos respecto de otros, y más aún, el resultado del análisis de los interferogramas es diferente en cada uno de estos. Para corroborar lo descrito anteriormente, se hace el análisis de algunos interferogramas mediante los programas comerciales *Apex* y *Durango* y se realiza una comparación de los resultados obtenidos.

Índice

1. Capítulo 1. Introducción	3
1.1. Interferómetro de Newton	4
1.2. Interferómetro de Fizeau	4
1.3. Estimación rápida de la deformación máxima de las franjas realizando directamente un trazo sobre el interferograma	6
1.4. Interferograma simulado y analizado con el programa comercial <i>Apex</i>	7
1.5. Estimación rápida de la deformación máxima de las franjas realizando directamente un trazo sobre el interferograma simulado	9
1.6. Conclusiones	10
2. Capítulo 2. Análisis de un interferograma real	12
2.1. Análisis del interferograma real utilizando <i>Apex</i>	12
2.2. Manipulación del programa <i>Apex</i> para un mejor trazo de las franjas en el interferograma	14
2.3. Trazo a mano para determinar la máxima deformación en las franjas del interferograma experimental	15
2.4. Conclusiones	15
3. Capítulo 3. Análisis de interferogramas experimentales	18
3.1. Análisis de interferogramas experimentales	18
3.2. Análisis de un interferograma previamente procesado para un mejor trazo de las franjas	23
3.3. Análisis del interferograma utilizando el programa comercial <i>Durango</i>	27
3.4. Conclusiones	29

1. Capítulo 1. Introducción

Considerando dos fuentes puntuales que son coherentes, con la misma frecuencia y que están separadas por una distancia cercana a la longitud de onda, las fuentes generan frentes de onda esféricos que se propagan y en un plano posterior estos se superponen entre sí dando como resultado el fenómeno de interferencia (Hecht , 2000).

En el área de pruebas ópticas la medición de la forma de la superficie es una de las tareas más importantes en la que se debe determinar si la superficie fabricada cumple con los parámetros de su diseño. La detección del frente de onda dado por la interferometría es una técnica comúnmente usada para el análisis de la calidad óptica de una superficie o sistema óptico, y su precisión puede alcanzar algunas fracciones de la longitud de onda de la fuente de iluminación.

Al igual que en cualquier medición, es necesario contar con un patrón de referencia con el que podamos comparar lo que se va a medir, entonces, para evaluar el *frente de onda de prueba* generado por la superficie sometida a estudio, se necesita un *frente de onda de referencia* generado por una superficie bien corregida en sus aberraciones. Por tanto, la superposición de ambos frentes de onda (Figura ??), dará como resultado una disposición de franjas brillantes y oscuras mejor conocido como patrón de interferencia o interferograma. A través del análisis cualitativo o cuantitativo de la forma de las franjas se puede determinar la forma de la superficie de prueba.

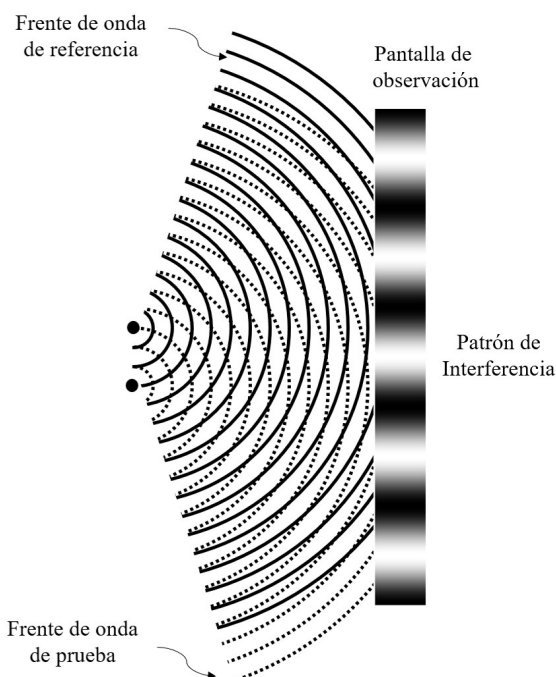


Figura 1: *Experimento de Young: Superposición de ondas esféricas que muestran máximos y mínimos de intensidad llamados patrón de interferencia.*

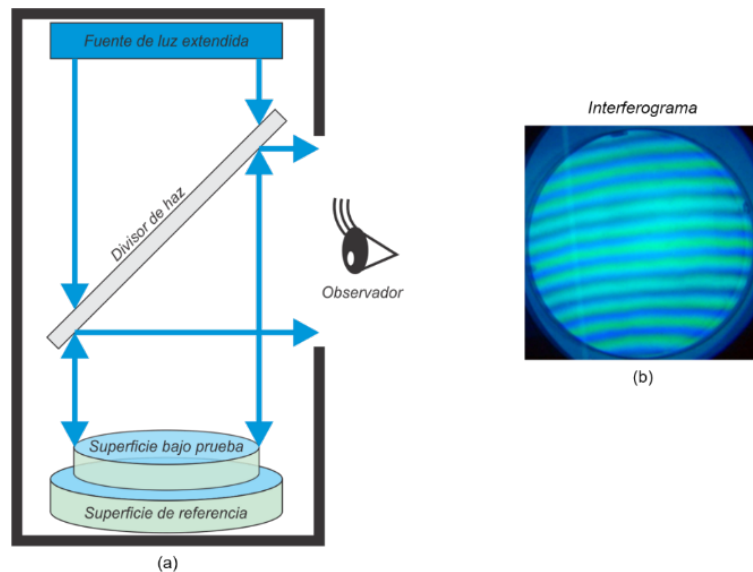


Figura 2: *Interferómetro de Newton. (a) Esquema del funcionamiento, (b) Interferograma obtenido al probar una superficie aproximadamente plana contra un plano de referencia.*

Generalmente en los talleres de fabricación de componentes ópticas, los instrumentos que comúnmente se utilizan para la evaluación de la calidad óptica son: el interferómetro de Newton y el interferómetro Fizeau. En ambos instrumentos, se necesita una superficie de referencia de alta calidad óptica para generar el frente de onda de referencia que será comparado con el frente de onda de la superficie que se desea probar.

1.1. Interferómetro de Newton

Este interferómetro es uno de los instrumentos más simples y poderosos que permiten evaluar la calidad de superficies ópticas con alta precisión (Mantravadi y Malacara, 2007). Básicamente consiste en una fuente de luz extendida, un divisor de haz, la superficie de referencia y la superficie de prueba (Figura 2). En este interferómetro, la superficie de prueba se pone en contacto con la superficie de referencia, las diferencias entre ambas superficies, darán lugar a una película delgada de aire entre ellas y en consecuencia una diferencia de camino óptico entre los rayos reflejados por la superficie de prueba y los rayos reflejados por la superficie de referencia dando como resultado un patrón de franjas brillantes y oscuras conocido como patrón de interferencia o interferograma.

1.2. Interferómetro de Fizeau

Este interferómetro consiste básicamente de un sistema de luz colimada utilizando un láser como fuente de iluminación, posteriormente se coloca la superficie de referencia y en un plano posterior se coloca la superficie de prueba como se muestra en la figura 3. La principal ventaja que tiene el

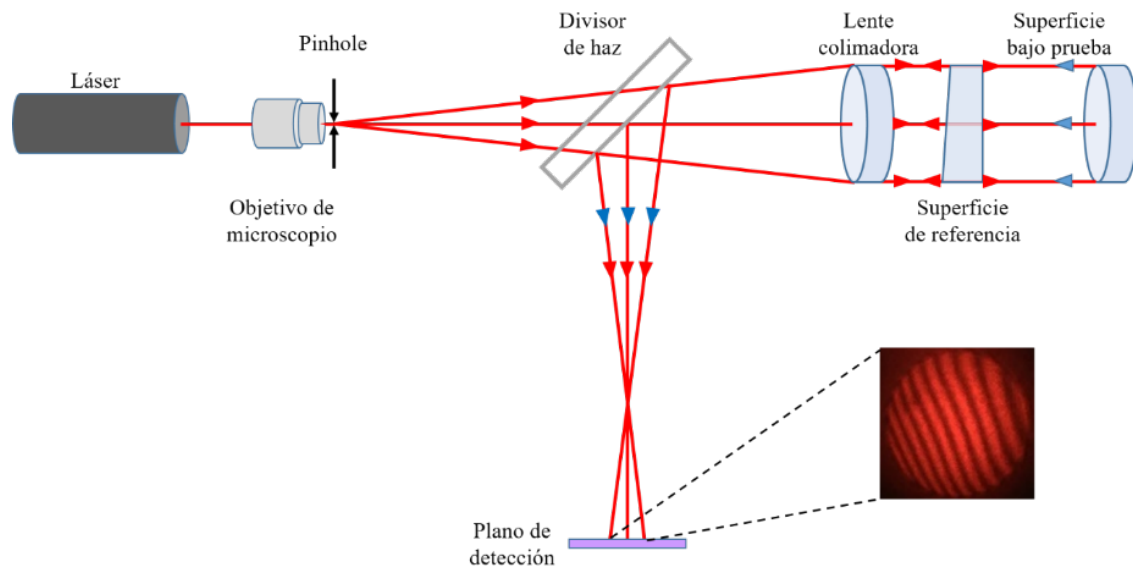


Figura 3: Esquema del funcionamiento del interferómetro de Fizeau.

interferómetro de Fizeau respecto al interferómetro de Newton, es que en esta prueba las superficies no necesariamente deben estar en contacto directo, esto ayuda a evitar que accidentalmente se rayen las superficies ópticas al manipularlas (Mantravadi y Malacara , 2007).

El principio de funcionamiento de este interferómetro consiste en hacer llegar a la superficie de referencia un frente de onda plano, parte de este se refleja en la cara posterior de la superficie de referencia (frente de onda de referencia), de tal manera que los rayos regresan por el mismo camino en que llegaron y antes de ser enfocados, son desviados por medio de un divisor de haz que se coloca a un ángulo de 45 grados respecto al eje óptico como se muestra en la figura 3 y finalmente son interceptados por un plano de detección.

La otra parte del frente de onda pasa a través de la superficie de referencia llegando hasta la superficie de prueba donde es reflejado y después es desviado por el divisor de haz para finalmente llegar al plano de detección (frente de onda de prueba). Entonces la superposición de los frentes de onda de referencia y de prueba dan lugar al patrón de interferencia.

Si las componentes del interferómetro están perfectamente alineadas y la superficie de referencia y de prueba son idealmente planas, solo veremos un máximo de intensidad (una franja brillante), o bien, un mínimo de intensidad (una franja oscura) en el plano de detección, lo cual no es conveniente para hacer mediciones, por tanto, siempre se debe dar un poco de inclinación a la superficie de prueba para tener un patrón con un número adecuado de franjas.

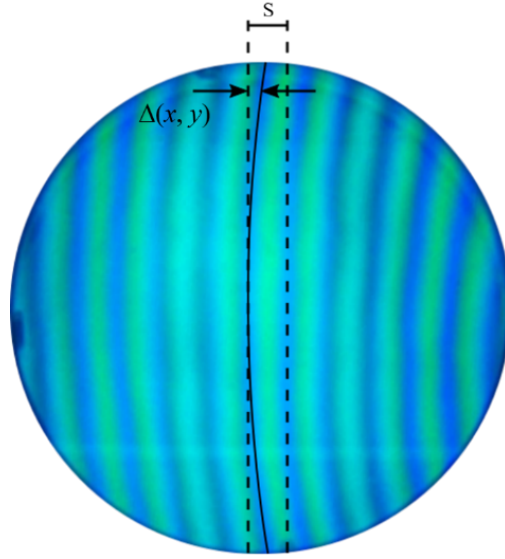


Figura 4: Estimación rápida del error máximo de la deformación de las franjas del patrón de interferencia.

1.3. Estimación rápida de la deformación máxima de las franjas realizando directamente un trazo sobre el interferograma

A partir del patrón de franjas se puede obtener la máxima deformación que existe en la superficie de prueba. Considerando que la distancia teórica entre dos franjas oscuras consecutivas es $\lambda/2$ (Mantravadi y Malacara , 2007), y que además podemos medir directamente sobre el interferograma las distancias S y $\Delta(x, y)$, entonces el error de la superficie bajo prueba respecto a la de referencia será

$$x = \frac{\lambda}{2} \frac{\Delta}{S} \quad (1)$$

donde x representa el error correspondiente para un punto en particular sobre el interferograma, de manera que si se desea conocer el error global de la superficie es necesario hacer un muestreo de un gran número de puntos.

En la figura 4 se puede observar que la máxima deformación de las franjas respecto a las ideales se tiene en las orillas del interferograma y mediante la ecuación anterior se puede determinar cuantitativamente el error.

Existen programas comerciales que pueden determinar las aberraciones presentes en las superficies ópticas a través del análisis de sus interferogramas, estos programas operan mediante el uso de los polinomios de Zernike y finalmente hacen la reconstrucción gráfica de la topografía de la superficie óptica que se está analizando. En particular, haremos un estudio del programa comercial “APEX”, y describiremos su funcionamiento y la efectividad de los resultados que se obtienen con este.

1.4. Interferograma simulado y analizado con el programa comercial *Apex*

Apex es un software comercial de *Lambda Research Corporation* (<https://www.lambdaresearch.com/>), este fue uno de los primeros programas desarrollados en el año 2000 para el análisis de interferogramas, sin embargo, en la actualidad este software ya no está disponible.

Como un ejemplo particular, usaremos el programa *Apex* para simular un interferograma con algunas aberraciones con valores arbitrarios y posteriormente lo analizaremos con este mismo programa para ver si se recuperan las mismas aberraciones propuestas en la simulación.

Las aberraciones propuestas en el interferograma simulado tienen unidades de longitud de onda, donde $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ y son: *Esférica* = 0.05λ y *Coma en la dirección x* = 0.5λ además agregamos un término de *Tilt* = 2λ , los datos geométricos de la superficie a simular son: diámetro = 25.4 mm y como se trata de una superficie plana consideraremos, $F/\# = 1000000$, en la figura 5 se muestran los datos de las aberraciones y en la figura 6 se muestra el interferograma sintético obtenido en la simulación

	3rd	5th	7th	9th	11th
Spherical	0.05	0	0	0	0
Y Coma	0	0	0	0	0
X Coma	0.5	0	0	0	0
45° Astig	0	0	0	0	0
0° Astig	0	0	0	0	0
0° Tri		0	0	0	0
30° Tri		0	0	0	0
22.5° Quad			0	0	0
0° Quad			0	0	0
18° Penta				0	0
0° Penta				0	0
15° Hex					0
0° Hex					0

Figura 5: Aberraciones propuestas en el programa *Apex* para la simulación del interferograma.

Posteriormente el interferograma es analizado con el mismo programa, como primer paso, *Apex* encuentra las franjas oscuras sobre el interferograma y hace el trazo de las mismas, además, hace un cálculo de la raíz media cuadrática (*RMS*) de la deformación sobre el interferograma y también calcula la diferencia *Pico-Valle* en unidades de la longitud de onda (Figura 7).

Como segundo paso, el programa hace el cálculo de las aberraciones presentes en el interferograma mediante el uso de los Polinomios de Zernike. Los resultados obtenidos se muestran en la figura

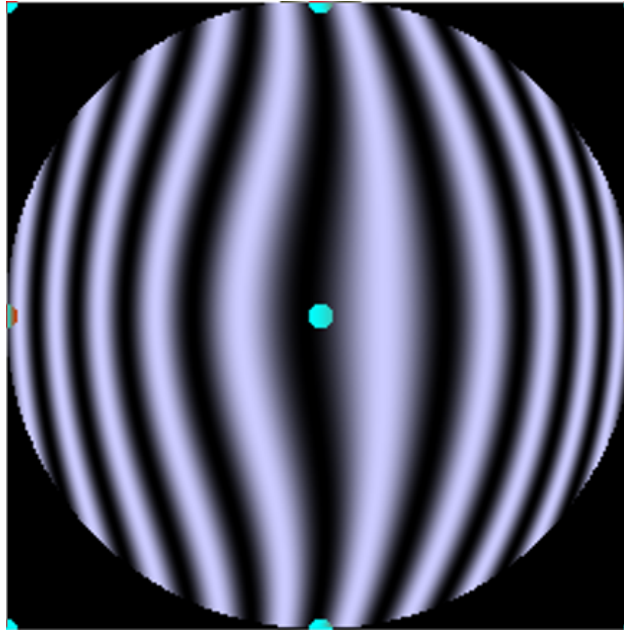


Figura 6: *Interferograma simulado en Apex.*

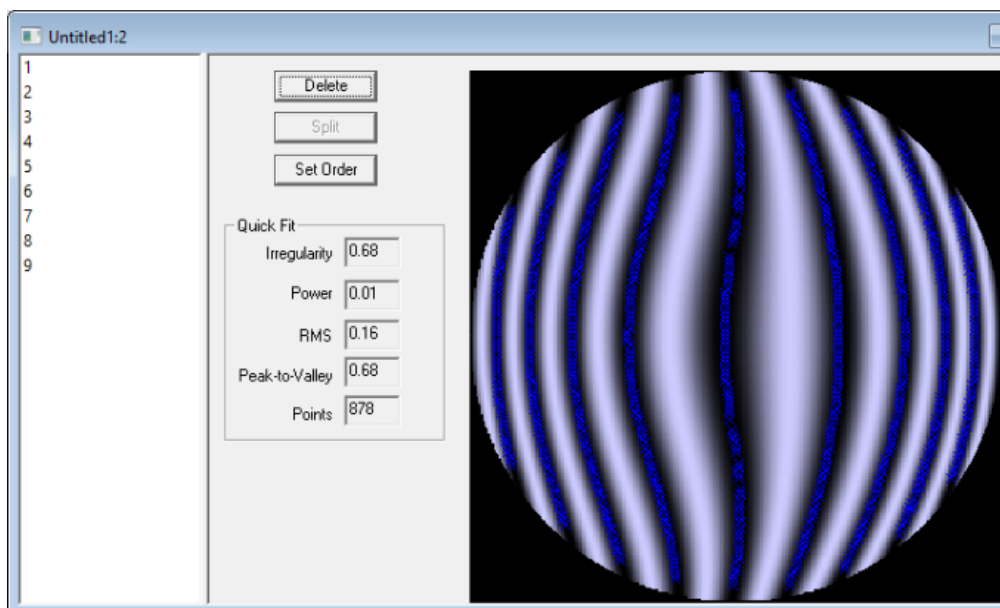


Figura 7: *Trazo de las franjas, cálculo de la RMS y diferencia Pico-Valle realizado por el programa Apex.*

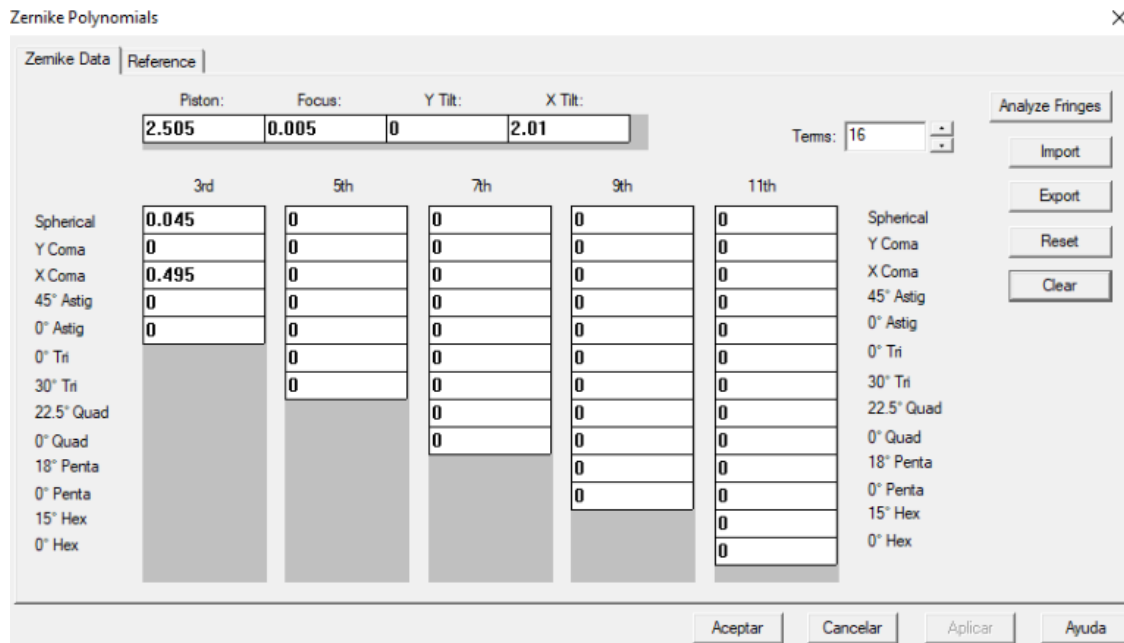


Figura 8: Aberraciones (unidades de longitud de onda) encontradas por el programa Apex al analizar el interferograma que fue simulado.

8 y se puede observar variaciones respecto a los valores de las aberraciones propuestas en la simulación del interferograma.

A diferencia del interferograma simulado con aberraciones, aquí Apex encuentra en el análisis de las franjas, un valor $RMS = 0.16\lambda$ y un valor $Pico-Valle = 0.68\lambda$. Adicionalmente encuentra dos términos: $Pistón = 2.505\lambda$ y $Defoco = 0.005\lambda$ mismos que en la simulación correspondían a cero. El valor de $Tilt = 2.01\lambda$ presenta un error de 0.01λ que corresponde a un error porcentual de 0.5 % con relación al valor que se asignó en la simulación. Para la aberración $Esférica = 0.045\lambda$ se tiene un error de 0.005λ y un error porcentual del 10 % y para la aberración $Coma x = 0.495\lambda$ también se tiene un error de 0.005λ que corresponde a un error porcentual del 1 %. Finalmente, entre otras opciones, el programa puede graficar un mapa de alturas en 2 dimensiones del frente de onda y un gráfico en 3 dimensiones de la forma de la superficie.

1.5. Estimación rápida de la deformación máxima de las franjas realizando directamente un trazo sobre el interferograma simulado

Siguiendo el procedimiento descrito en la sección 1.3, hacemos un trazo a mano directamente sobre el interferograma simulado (Figura 6) para determinar la desviación máxima de las franjas. Para realizar este proceso, medimos directamente con una escala milimétrica sobre el interfero-

grama las distancias S y $\Delta(x, y)$ como se muestra en la figura 9, de manera que la distancia entre dos mínimos intensidad consecutivos es 27 mm, por otra parte, de la interferometría sabemos que para este caso la distancia entre dos mínimos o máximos consecutivos es $S = \lambda/2$. Entonces, si $\Delta(x, y) = 14.1$ mm, usando la ecu.(1) tenemos que la máxima deformación de las franjas (en las orillas del interferograma), es aproximadamente 0.26λ .

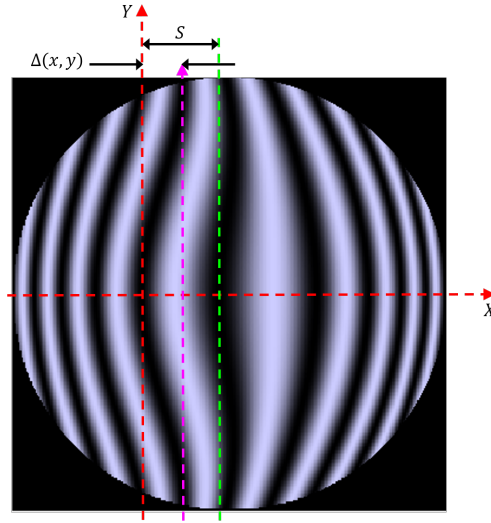


Figura 9: *Determinación de la desviación máxima de las franjas.*

1.6. Conclusiones

De acuerdo con los resultados descritos en las secciones anteriores, podemos notar que existen una diferencia aproximada de 0.4λ entre los valores de la deformación máxima o *Pico-Valle* obtenidos con el programa comercial *Apex* y el trazo a mano que se hace directamente sobre el interferograma, estas diferencias se muestran en la siguiente tabla.

Unidades en longitud de onda $\lambda = 632.28$ nm

	<i>RMS</i>	<i>Pico-Valle</i>	<i>Pistón</i>	<i>Defoco</i>	<i>Tilt en x</i>	<i>Esférica</i>	<i>Coma en x</i>
Interferograma simulado			0	0	2	0.05	0.5
Apex	0.16	0.68	2.505	0.005	2.01	0.045	0.495
Estimación rápida		0.26					

Tabla 1: *Comparación de las aberraciones simuladas y las obtenidas al analizar el interferograma.*

La estimación rápida del trazo a mano, se hace para un solo punto, y se procura realizar sobre

la franja que presente la mayor desviación, es por esta razón que sólo podemos estimar el error *Pico-Valle*. Para un análisis más completo y obtener la *RMS* se deberá muestrear un gran número de puntos sobre el interferograma. Sin embargo, por ahora nos limitaremos con un sólo punto ya que solo es una estimación parcial.

2. Capítulo 2. Análisis de un interferograma real

Ahora analizaremos un interferograma real que se obtiene al probar una superficie “plana” con diámetro de 25.4 mm contra otra superficie plana de referencia que tiene calidad óptica de $\lambda/10$. A simple vista se puede notar que a diferencia del interferograma simulado, la imagen del interferograma real contiene ruido óptico, es decir, la intensidad de la imagen varía de manera irregular como se muestra en la figura 10.

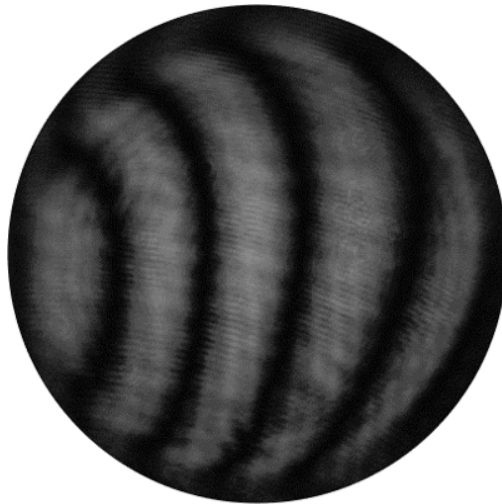


Figura 10: *Interferograma real obtenido al probar una superficie plana contra otra superficie plana de referencia que tiene una calidad óptica de $\lambda/10$.*

2.1. Análisis del interferograma real utilizando *Apex*

De igual manera como se hizo anteriormente, Apex encuentra las franjas oscuras en la imagen y realiza el trazo de estas sobre el interferograma, encontrando los valores $RMS = 0.66\lambda$ y un $Pico-Valle = 6.88\lambda$, tal como se muestra en la figura 11

También puede observarse que Apex está considerando otras zonas del interferograma como franjas oscuras, sin embargo, estas zonas no corresponden propiamente a franjas oscuras (ver figura 11). Por otra parte, el orden o número de franja que hace el programa en automático, es irregular y no se entiende bajo que condiciones hace esto. Aún así, se continua con el proceso para ver los resultados finales de las aberraciones que encuentra el programa, estos resultados se muestran en la figura 12

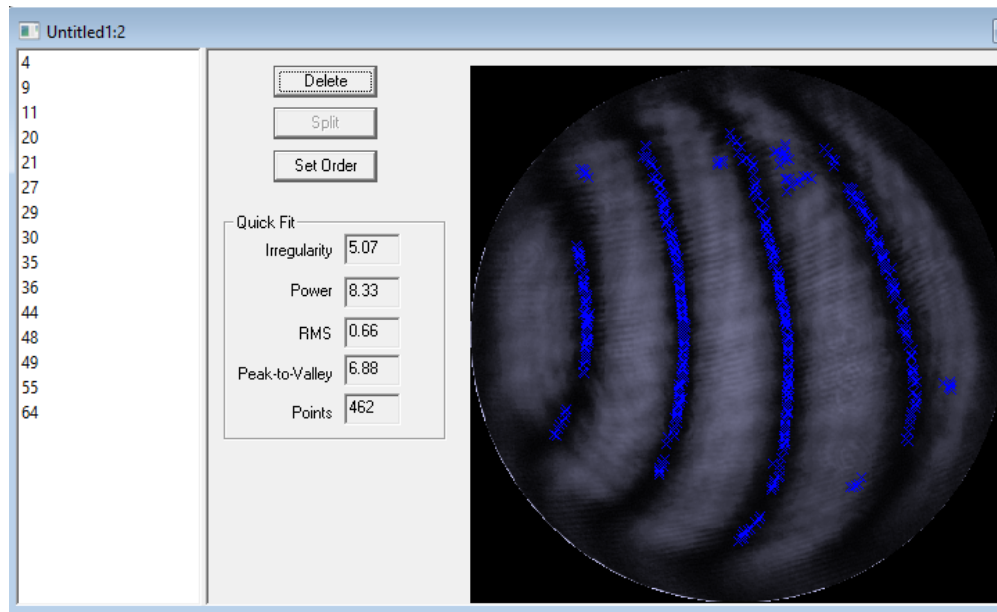


Figura 11: *Franjas oscuras del interferograma real encontradas por default por el programa Apex, se obtuvo un valor del RMS = 0.66λ y un Pico-Valle = 6.88λ .*

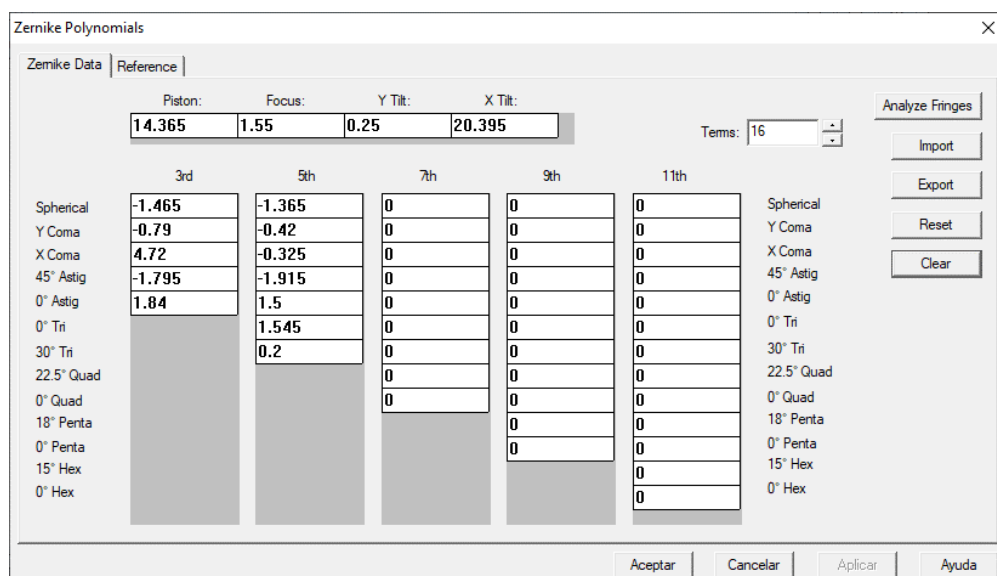


Figura 12: *Aberraciones del interferograma Real encontradas por default en el programa Apex.*

2.2. Manipulación del programa Apex para un mejor trazo de las franjas en el interferograma

Como se vio en la sección anterior, al dar la instrucción al programa *Apex* para encontrar por default las franjas oscuras, el programa considera ciertas regiones que no son franjas reales (ver figura 11), solo es ruido en la imagen que se debe a la intensidad irregular y al mal contraste en el interferograma. De manera que para eliminar este problema, *Apex* tiene la opción de eliminar las franjas encontradas por default y permite trazar nuevas franjas a mano, además, permite modificar el orden de las franjas como se muestra en la figura 13.

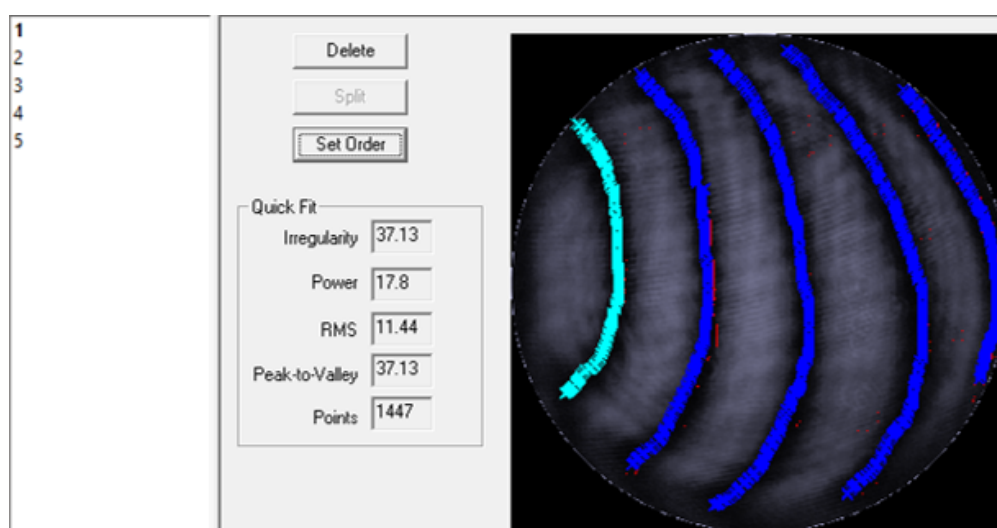


Figura 13: Trazo de nuevas franjas y modificación del orden de las mismas en el programa *Apex*, $RMS = 11.44\lambda$ y $Pico-Valle = 37.13\lambda$.

Después de haber trazado a pulso las franjas en el interferograma, también cambiamos el orden de las estas quedando numeradas de 1 hasta 5 como aparecen de izquierda a derecha, teniendo un nuevo valor de $RMS = 1.44\lambda$ y un $Pico-Valle = 37.13\lambda$. Y finalmente se obtienen los valores de las aberraciones que se muestran en la figura 14

El hecho de trazar manualmente las franjas del interferograma en *Apex* y modificar el orden de las franjas, debería mejorar los valores del RMS y el $Pico-Valle$ en relación a los valores obtenidos cuando el procedimiento se hace por default, sin embargo, se puede observar que no sucede esto, si no al contrario, estos valores crecen considerablemente, lo que nos lleva a concluir, que no es buena opción manipular el trazo de las franjas.

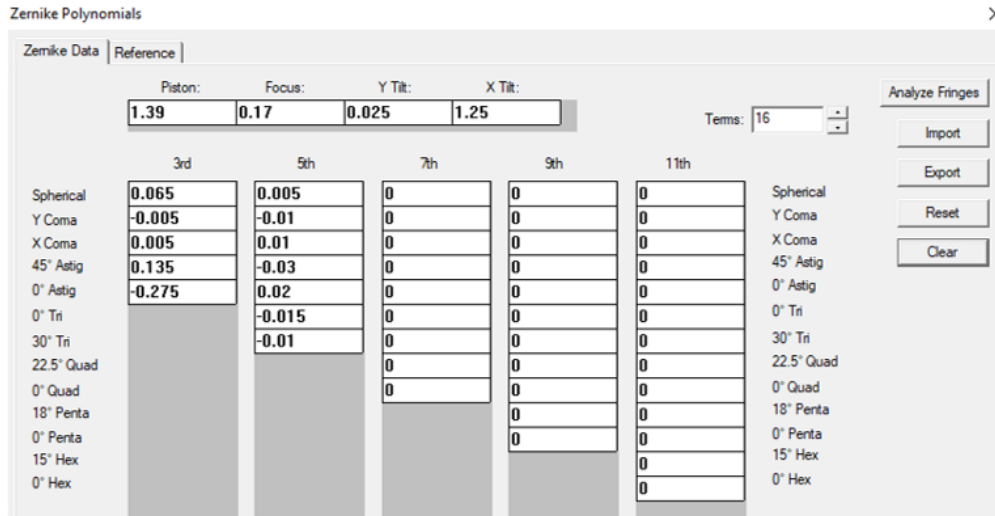


Figura 14: Aberraciones del interferograma real con el trazo manual de las franjas en el programa Apex.

2.3. Trazo a mano para determinar la máxima deformación en las franjas del interferograma experimental

De la misma manera como se ha realizado anteriormente, para determinar que tan cierto es el valor *Pico-Valle* determinado por Apex, hacemos un trazo a mano sobre el interferograma experimental para determinar el valor *Pico-Valle* máximo de deformación de las franjas en el interferograma experimental como se muestra en la figura 15.

Realizadas las mediciones sobre el interferograma experimental, se tiene que $S = 25.4\text{mm}$ y que $\Delta x = 19.9\text{mm}$ y como ya sabemos entre dos mínimos consecutivos hay $\lambda/2$ de separación, entonces nuevamente sustituimos estos valores en la ec.(1) y se tiene que la deformación máxima para la franja analizada es de $0.783(\lambda/2)$.

En la tabla 2 se muestran los resultados que se obtienen al evaluar el interferograma por los tres métodos descritos anteriormente. Aunque el trazo que se hace a mano es para un solo punto, nos da un valor aproximado de la deformación máxima o valor *Pico-Valle* que existe en la superficie bajo prueba, que para este caso en particular corresponde a un valor de 0.783λ y que difiere bastante de los otros dos casos.

2.4. Conclusiones

Los resultados encontrados en los procesos anteriores, difieren unos con otros en gran medida como se muestra en la tabla 2, si observamos específicamente el valor *Pico-Valle*, para los tres casos se tiene que:

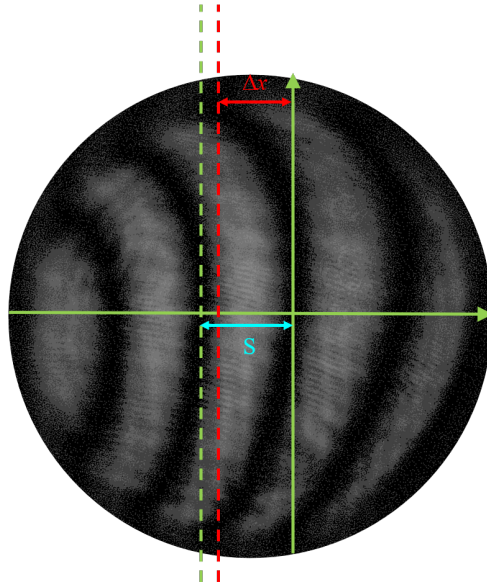


Figura 15: *Estimación rápida de la deformación máxima de las franjas en el interferograma experimental, $S = 25.4$ mm y $\Delta x = 19.9$ mm.*

- Cuando el programa hace el trazo de las franjas automáticamente el valor es 6.88λ
- Para el caso en el que las franjas son trazadas dentro del programa el resultado es 37.13λ
- Finalmente, cuando el cálculo se hace a mano sobre el interferograma se tiene un valor de 0.783λ

En conclusión, los resultados mostrados en la tabla 2, deberían ser aproximadamente iguales, es decir, las variaciones no deberían ser tan distantes unas con otras, en consecuencia, podemos afirmar que el valor *Pico-Valle* más aproximado a la deformación real de las franjas del interferograma, se tienen cuando calculamos a mano la deformación máxima en un punto en la orilla de la franja que presenta mayor deformación en el interferograma. Por otra parte, si se desea utilizar el programa *Apex* para evaluación, debemos dejar que el programa haga por default el trazo de franjas y su análisis, de lo contrario, si manipulamos los procesos, los resultados presentarán mayor error como ya se ha observado.

Unidades en longitud de onda $\lambda = 632.28$ nm

	Trazo de franjas por default en Apex	Trazo de franjas manual en Apex	Estimación rápida
<i>RMS</i>	0.66	11.44	
<i>Pico-Valle</i>	6.88	37.13	0.783
<i>Pistón</i>	14.365	1.39	
<i>Defoco</i>	1.55	0.17	
<i>Tilt en x</i>	20.395	1.25	
<i>Tilt en y</i>	0.25	0.025	

Aberraciones a 3er orden

<i>Esférica</i>	-1.465	0.065	
<i>Coma x</i>	4.72	0.005	
<i>Coma y</i>	-0.79	-0.005	
<i>Astig 0°</i>	1.84	-0.275	
<i>Astig 45°</i>	-1.795	0.135	

Tabla 2: Comparación de los valores obtenidos al trazar las franjas por default en Apex, trazo de franjas manual en Apex y Estimación rápida.

3. Capítulo 3. Análisis de interferogramas experimentales

En los capítulos anteriores hemos visto que el programa *Apex* no es confiable para el análisis de interferogramas no sintéticos y que presentan mucho ruido en las franjas, el problema radica en la incorrecta interpretación de las franjas oscuras. Por tanto, en este capítulo describiremos los resultados que se obtienen automáticamente al analizar interferogramas experimentales en *Apex* y los resultados que se obtienen con el mismo programa al analizar los interferogramas previamente procesados con CorelDraw para el trazo más aproximado de la forma de las franjas.

3.1. Análisis de interferogramas experimentales

Para determinar que tan repetible son los resultados del análisis que hace el programa *Apex*, analizaremos una serie de interferogramas que se obtiene al probar una superficie aproximadamente plana contra un plano de referencia con calidad óptica de $\lambda/10$ en un interferómetro de Fizeau (figura 3), donde la longitud de onda de la fuente de luz utilizada es $\lambda = 632.28$ nm. La única diferencia entre los interferogramas que serán analizados, es que la separación entre la superficie de prueba y la de referencia varía en pasos de 50 micras para cada interferograma.

De igual manera como se realizado anteriormente, se hace el análisis de los interferogramas en el programa *Apex*, comenzando por la adquisición de la imagen experimental, luego el trazo de franjas y finalmente el cálculo de las aberraciones, los resultados se muestran a continuación

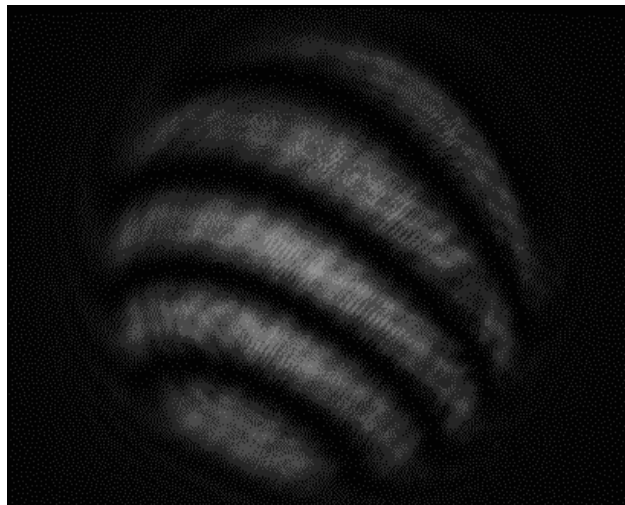


Figura 16: *Interferograma experimental obtenido a una distancia de separación de 5cm aproximadamente entre la superficie de referencia y la superficie de prueba.*

Como se puede observar, aunque la distancia de separación entre la superficie de prueba y la superficie de referencia cambia, los interferogramas son aproximadamente iguales, es decir el

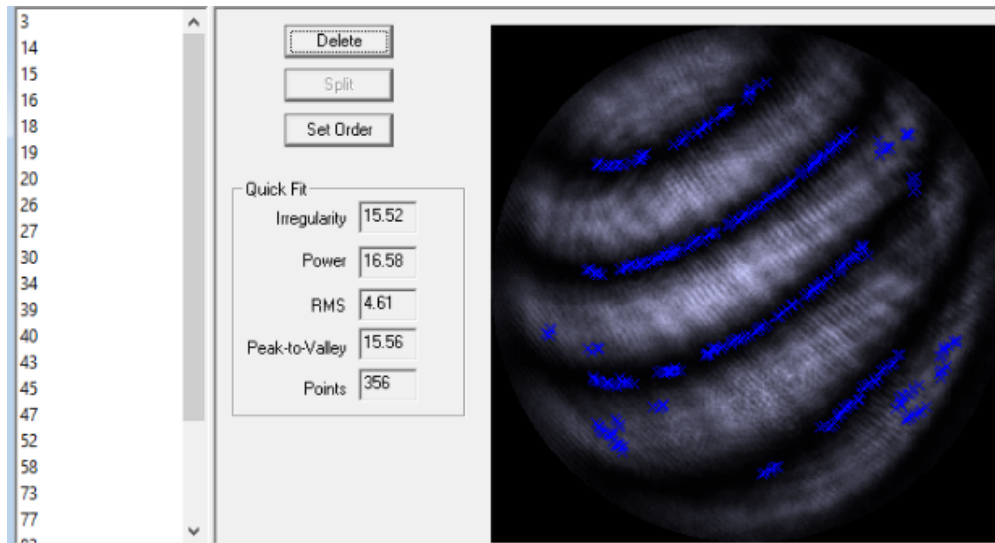


Figura 17: Trazo de franjas realizado automáticamente por el programa Apex del interferograma de la figura 16.

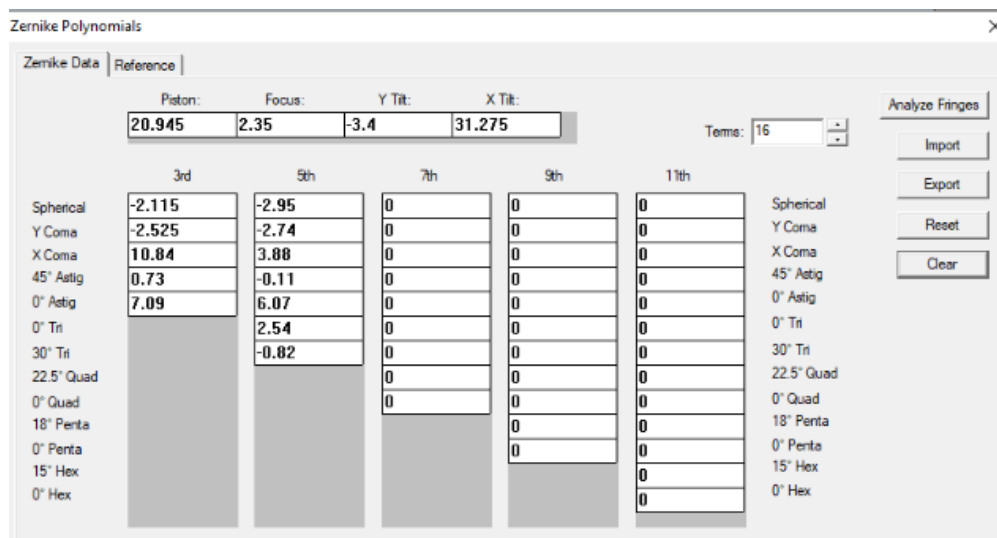


Figura 18: Aberraciones obtenidas en el programa Apex a partir del trazo de franjas de la figura. 17



Figura 19: *Interferograma experimental obtenido al reducir la distancia de separación entre la superficie de referencia y la superficie de prueba en 50 micras respecto a la posición inicial = 5 cm.*

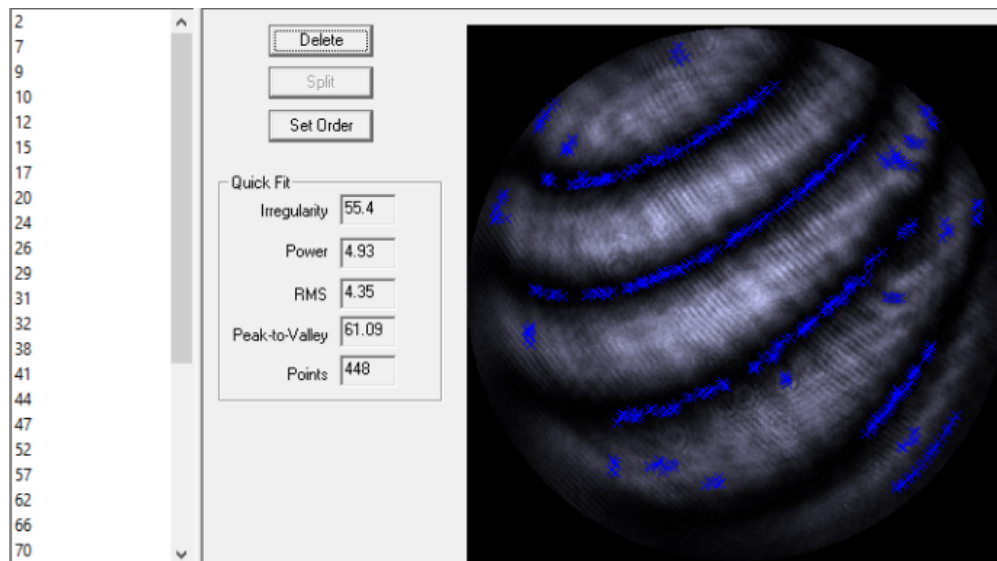


Figura 20: *Trazo de franjas realizado automáticamente por el programa Apex del interferograma de la figura 19.*

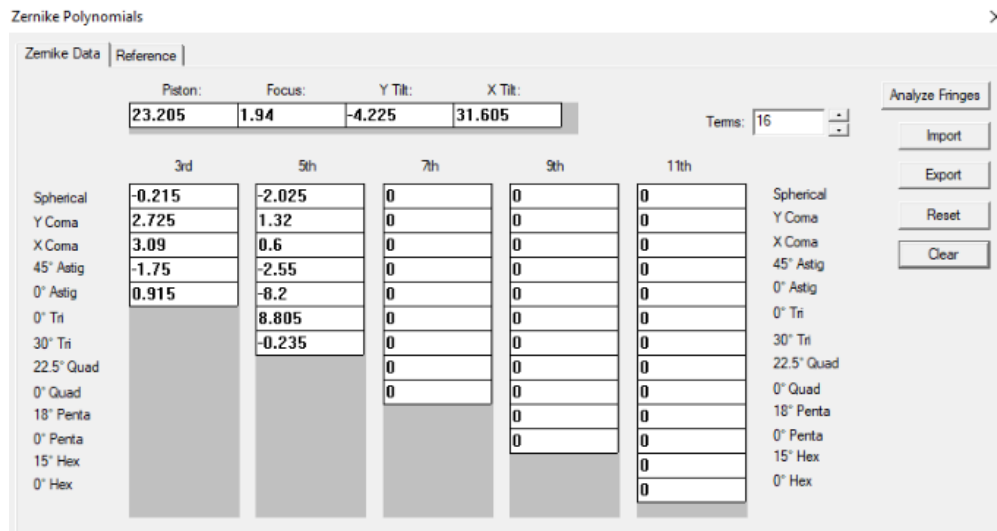


Figura 21: Aberraciones obtenidas en el programa Apex a partir del trazo de franjas de la figura 20.

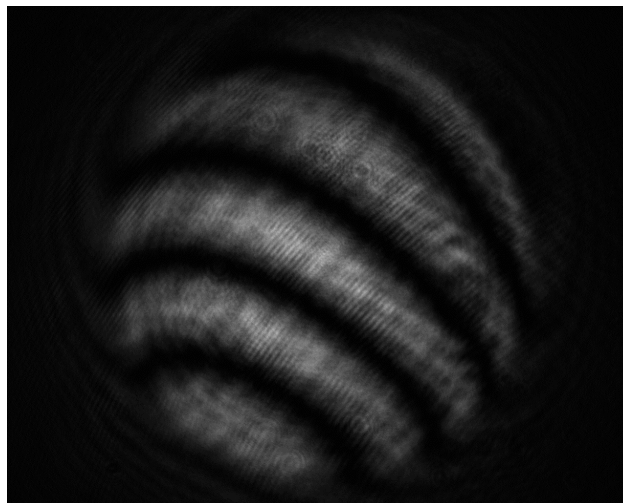


Figura 22: Interferograma experimental obtenido al reducir la distancia de separación entre la superficie de referencia y la superficie de prueba en $100\ \mu\text{m}$ respecto a la posición inicial $= 5\ \text{cm}$.

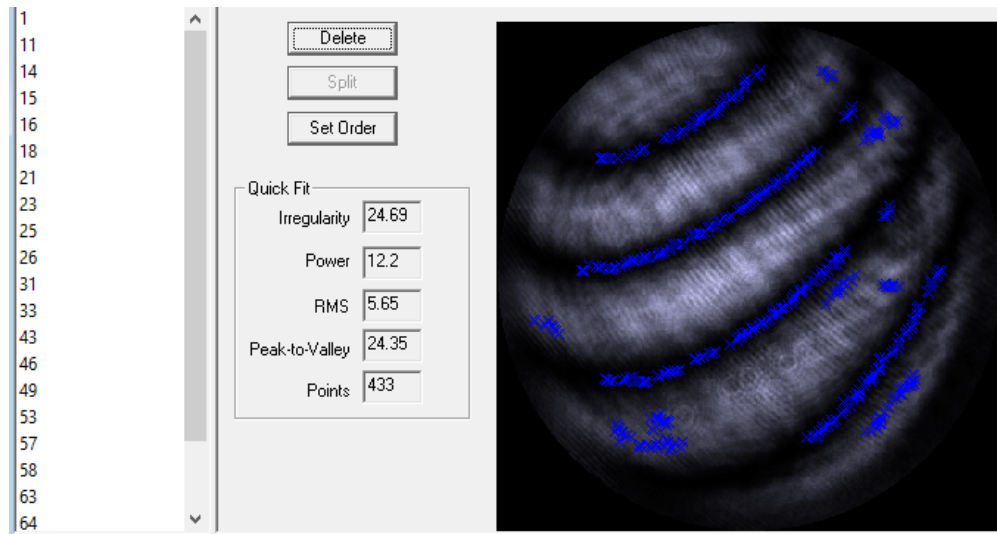


Figura 23: Trazo de franjas realizado automáticamente por el programa Apex del interferograma de la figura 22.

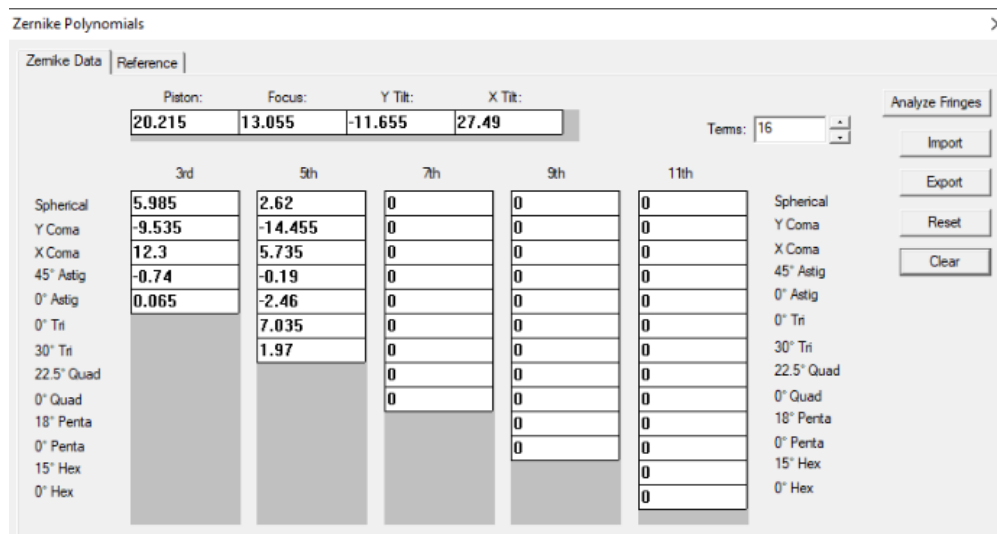


Figura 24: Aberraciones obtenidas en el programa Apex a partir del trazo de franjas de la figura 23.

Unidades en longitud de onda $\lambda = 632.28 \text{ nm}$

	Interferogramas experimentales			
	Interferograma 1	Interferograma 2	Interferograma 3	Promedio
<i>RMS</i>	4.61	4.35	5.65	4.86
<i>Pico-Valle</i>	15.56	61.09	24.35	33.66
<i>Pistón</i>	20.945	23.205	20.215	21.46
<i>Defoco</i>	2.35	1.94	13.055	5.78
<i>Tilt en x</i>	31.275	31.605	27.49	30.12
<i>Tilt en y</i>	-3.4	-4.225	-11.655	-6.43
Aberraciones a 3er orden				
<i>Esférica</i>	-21.15	-0.215	5.985	-5.13
<i>Coma x</i>	10.84	3.09	12.3	8.74
<i>Coma y</i>	-2.525	2.725	-9.535	-3.11
<i>Astig 0°</i>	7.09	0.915	0.065	2.69
<i>Astig 45°</i>	0.73	-1.75	-0.74	-0.59

Tabla 3: *Aberraciones obtenidas en Apex al evaluar tres interferogramas experimentales aproximadamente iguales.*

número de franjas oscuras es el mismo para los tres casos (ver figuras 16, 19 y 22), por tanto, al analizarlos con *Apex* debería obtenerse aproximadamente los mismos valores de *RMS*, *Pico-Valle* y de las *Aberraciones*, sin embargo esto no sucede, lo que significa que los resultados calculados por el programa no son repetibles.

En la tabla 3 se muestran los diferentes valores de las aberraciones obtenidas al analizar cada interferograma, como puede observarse para algunas aberraciones los valores difieren en varias longitudes de onda, por ejemplo, para el *Pico-Valle* se obtuvieron los valores 15.56λ , 61.09λ y 24.35λ para el primer, segundo y tercer interferograma respectivamente, de igual manera se pueden ver diferencias en las aberraciones *Esférica*, *Coma* y *Astigmatismo*. Estas diferencias no deberían ser tan distantes, es decir, los valores en las aberraciones deberían ser muy aproximados unos con otros ya que los tres interferogramas son aproximadamente iguales.

En la cuarta columna se muestra el promedio de las aberraciones considerando el análisis que se hace para cada interferograma, este valor promedio, es el resultado más aproximado de análisis de las franjas del interferograma.

3.2. Análisis de un interferograma previamente procesado para un mejor trazo de las franjas

Como ya se ha visto, a lo largo de este estudio, el problema principal de *Apex* radica en la mala interpretación que hace de las franjas y que este deriva de la mala intensidad y el mal contraste que tienen las imágenes. Entonces, para tratar de reducir el problema, se hizo el procesamiento

de un interferograma para lograr un trazo más aproximado de la forma de las franjas utilizando el software comercial CorelDraw 7.

Para el desarrollo de este proceso elegimos utilizar el interferograma de la figura 16, como primer paso, recortamos el área de la imagen que corresponde únicamente al interferograma (figura 25a), como segundo paso, se trazan las franjas con una línea muy fina a manera de seguir la zona central más oscura de la forma de las franjas del interferograma (figura 25b), el tercer paso es dar un mayor grosor a las franjas que fueron en el paso anterior (figura 25c), finalmente el cuarto paso es dejar únicamente en color negro las franjas del interferograma y resto de la imagen en blanco para eliminar los problemas de intensidad y contraste (figura 25d),

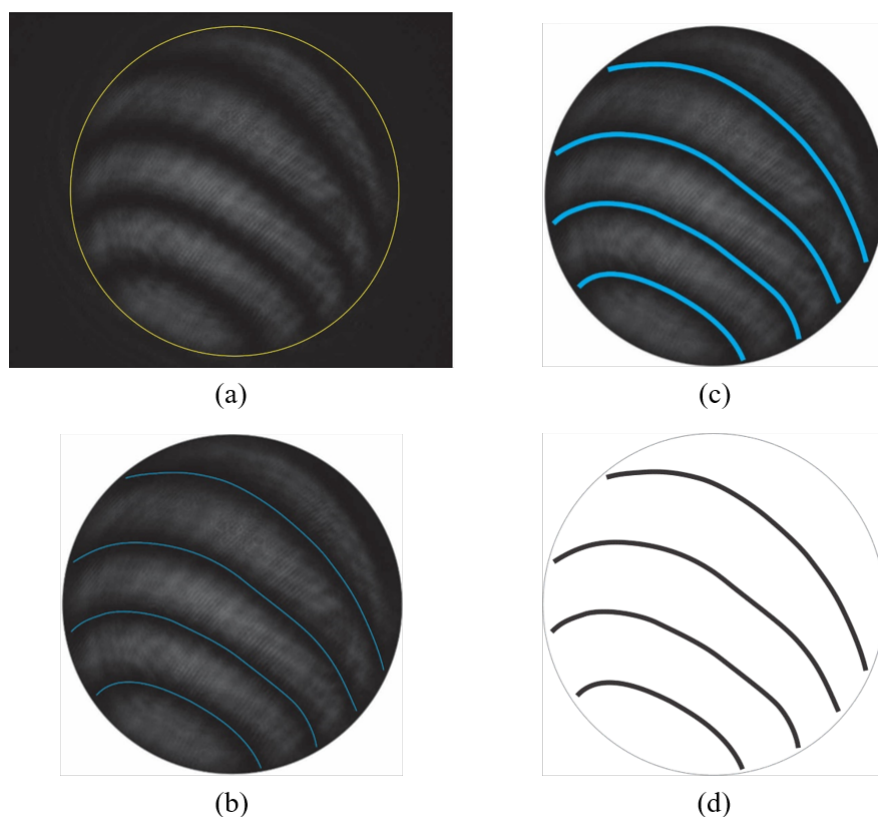


Figura 25: *Procesamiento del interferograma para un trazo más aproximado de la forma de las franjas y eliminar los problemas de intensidad y contraste.*

Una vez que el interferograma fue procesado en *CorelDraw*, ahora es sometido al programa *Apex* para su análisis de igual manera como se ha descrito anteriormente. Los resultados que se obtienen se muestran en las figuras (26) y (27)

Como se puede notar, en este proceso los valores $RMS= 0.57\lambda$ y $Pico-Valle= 1.91\lambda$ se han reducido considerablemente en comparación con el valor promedio de los resultados que se tienen

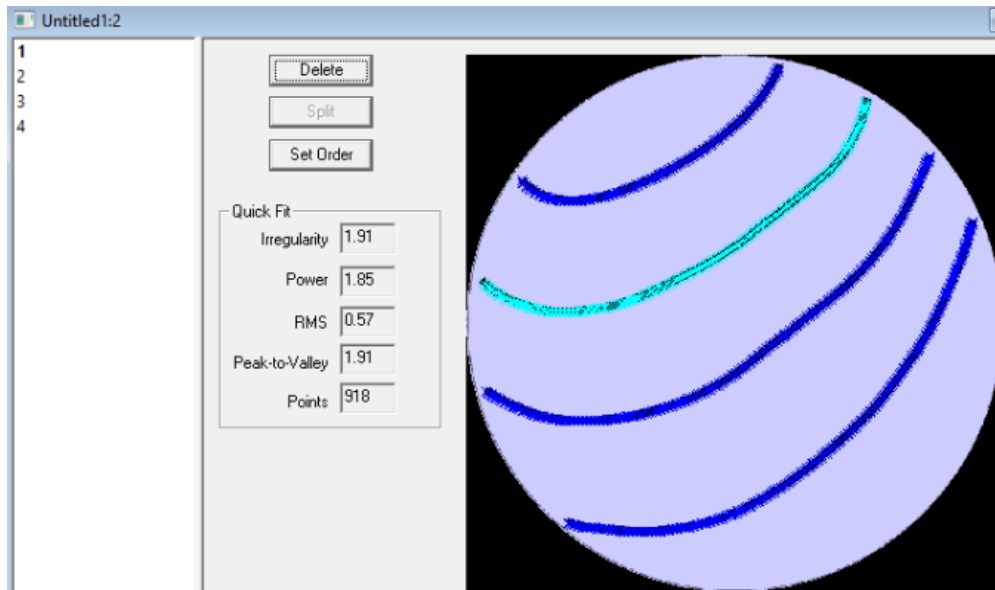


Figura 26: *Trazo de franjas en Apex del interferograma previamente procesado.*

cuando el interferograma contiene ruido y mal contraste. De igual manera pasa con el resto de las aberraciones, estos resultados se muestran en la tabla 4.

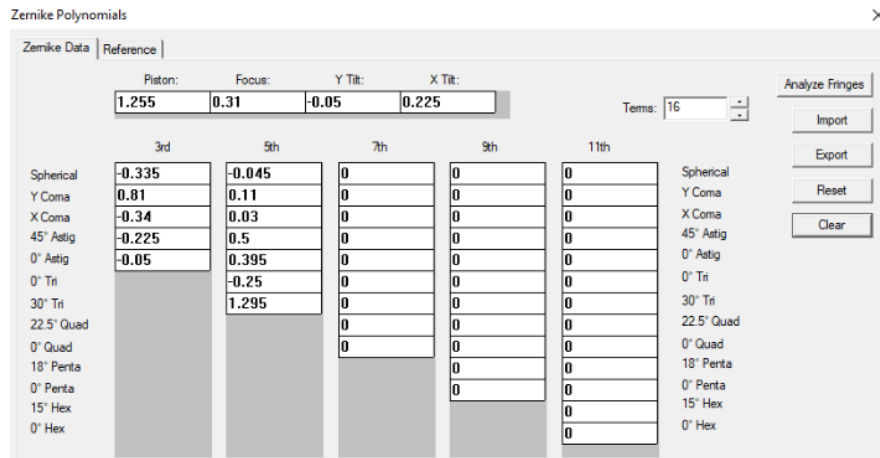


Figura 27: Aberraciones obtenidas del interferograma procesado.

Unidades en longitud de onda $\lambda = 632.28 \text{ nm}$

	Interferograma con ruido	Interferograma sin ruido
<i>RMS</i>	4.86	0.57
<i>Pico-Valle</i>	33.66	1.91
<i>Pistón</i>	21.46	1.255
<i>Defoco</i>	5.78	0.31
<i>Tilt en x</i>	30.12	0.225
<i>Tilt en y</i>	-6.43	-0.05

Aberraciones a 3er orden

<i>Esférica</i>	-5.13	-0.335
<i>Coma x</i>	8.74	-0.34
<i>Coma y</i>	-3.11	0.81
<i>Astig 0°</i>	2.69	-0.05
<i>Astig 45°</i>	-0.59	-0.225

Tabla 4: Comparación de las aberraciones obtenidas en Apex al evaluar el interferograma experimental con ruido y el interferograma que ha sido procesado para eliminar el ruido.

3.3. Análisis del interferograma utilizando el programa comercial *Durango*

En la sección anterior hemos visto que los valores de las aberraciones se reducen en gran medida cuando el interferograma es previamente procesado, sin embargo, es necesario probar con otro método que sea confiable para poder comparar los resultados.

El desarrollo de esta tarea, se hace en colaboración con el Dr. Rafael Izazaga Pérez, jefe del taller de óptica del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE). En este taller, se utiliza el software comercial *Durango* (https://diffraction.com/price_software.php), mismo que puede ser adquirido con la empresa *Diffraction International* y tiene un valor comercial de \$6950 dólares, este programa es utilizado en el taller de óptica del INAOE para evaluar la calidad óptica de las todas las superficies que se fabrican.

Como un caso particular, el interferograma de la figura 16 es analizado con el programa *Durango*, para obtener las aberraciones presentes, los resultados se muestran en la figura 28, con estos resultados, finalmente tenemos una comparación más determinante, como podemos notar, *Apex* mejora sus resultados cuando la imagen del interferograma se procesa previamente para quitar el ruido en la imagen de esta manera los resultados obtenidos son aproximados a los resultados calculados por el programa comercial *Durango* como se muestra en la tabla 5.

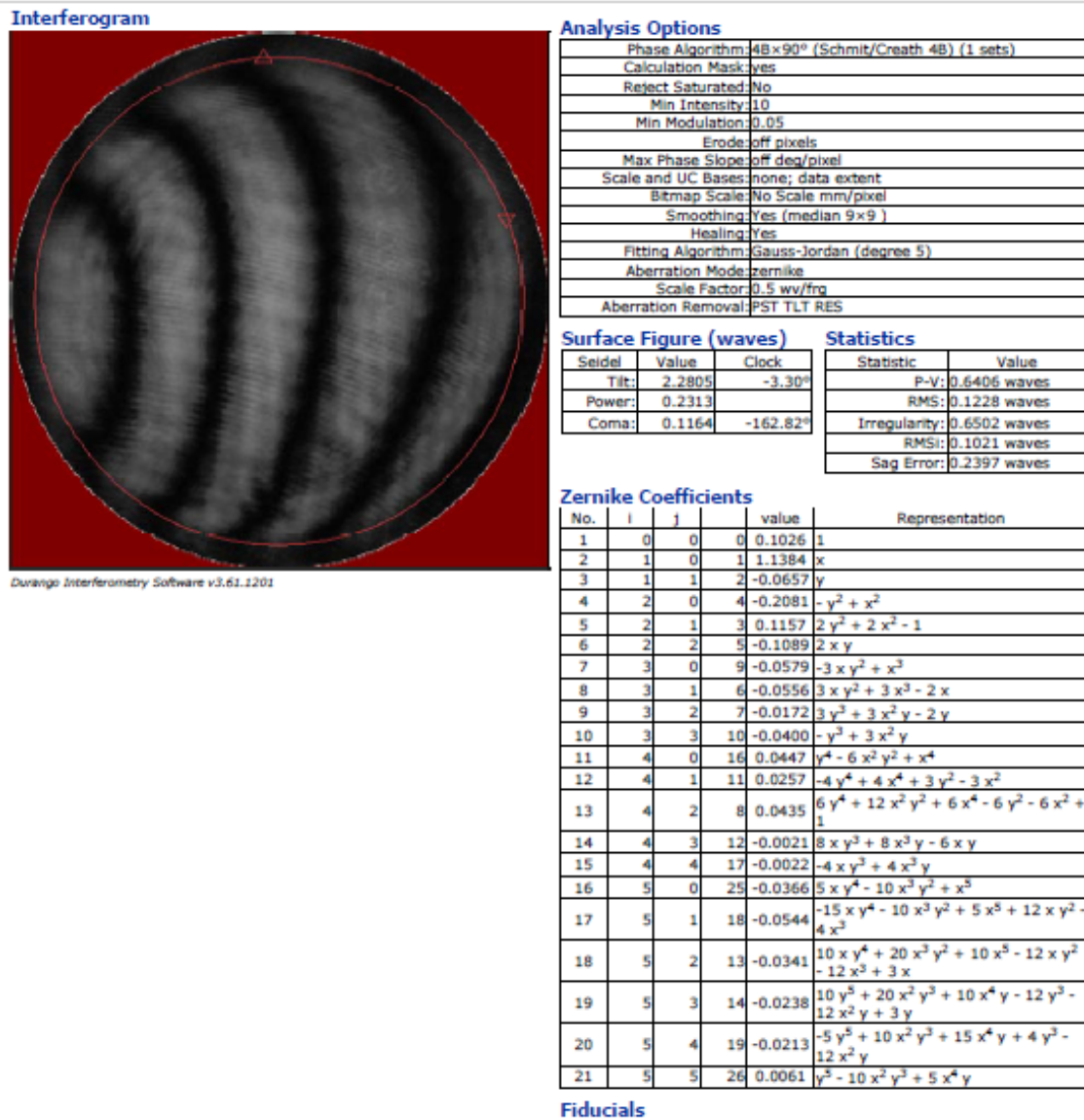


Figura 28: Aberraciones obtenidas al analizar el interferograma con el programa comercial Durango.

Unidades en longitud de onda $\lambda = 632.28$ nm

	Análisis con <i>Apex</i>		Análisis con <i>Durango</i>
	Interferograma con ruido	Interferograma sin ruido	Interferograma con ruido
<i>RMS</i>	4.86	0.57	0.1228
<i>Pico-Valle</i>	33.66	1.91	0.6406
<i>Pistón</i>	21.46	1.225	1
<i>Defoco</i>	5.78	0.31	-0.1157
<i>Tilt en x</i>	30.12	0.225	2.28 a un ángulo de -3.3°
<i>Tilt en y</i>	-6.43	-0.05	

Aberraciones a 3er orden

<i>Esférica</i>	-5.13	-0.335	0.0435
<i>Coma x</i>	8.174	-0.34	0.11 a un ángulo de -162.8°
<i>Coma y</i>	-3.11	0.81	
<i>Astig 0°</i>	2.69	-0.05	-0.2081
<i>Astig 45°</i>	-0.59	-0.225	-0.108

Tabla 5: Comparación de los valores obtenidos al trazar las franjas por default en *Apex*, trazo de franjas manual en *Apex* y Estimación rápida.

3.4. Conclusiones

Como ya se ha descrito y mostrado en las secciones previas, para obtener mejores resultados con el programa *Apex*, es necesario primero eliminar el ruido y trazar correctamente las franjas del interferograma en algún otro programa auxiliar. De esta manera los resultados pueden ser comparables con los resultados obtenidos por el programa *Durango*.

Por otra parte, el programa *Durango* puede analizar directamente los interferogramas e incluso con ruido (siempre y cuando el contraste de las franjas no sea tan deficiente), sin embargo, debido a su alto costo, resulta ser poco accesible, además de que por derechos reservados, se carece de información acerca de su funcionamiento y de las condiciones en las que opera. Por ahora, se deberá trabajar en el proceso a mano del trazo de franjas que se hace directamente sobre el interferograma para lograr un análisis completo y en un futuro construir un programa que realice el análisis completo.

Referencias Bibliográficas

Hecht, Eugene. (2000). **Óptica**, tercera edición, Addison wesley iberoamericana, Madrid.

M. V. Mantravadi y Malacara. (2007). **Optical Shop Testing: Newton, Fizeau and Haidinger Interferometers**, third Edition, John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey.

https://diffraction.com/price_software.php

<https://www.lambdares.com/>